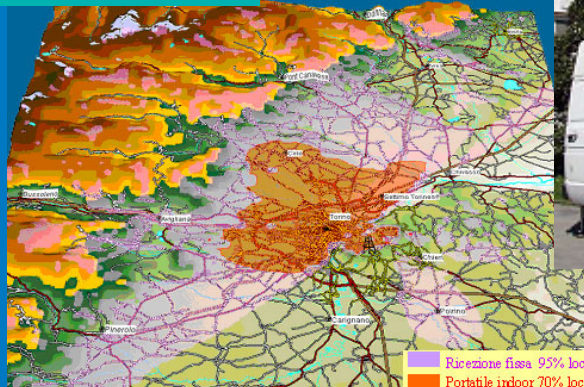
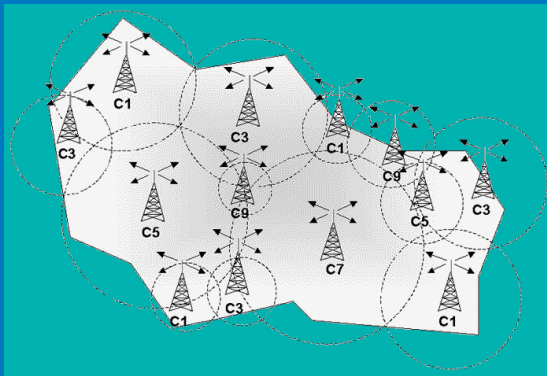
Elettronica e telecomunicazioni

ANNO LI
NUMERO 1
APRILE 2002

La televisione digitale terrestre

Un'opportunità per il nostro Paese

Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre

Valutazione in laboratorio del sistema DVB-T

Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio

Elettronica e telecomunicazioni

Edizione ottimizzata per la stampa.
La rivista è disponibile su web
alla URL www.crit.rai.it/eletel.htm

Anno LI
N° 1
Aprile 2002

Rivista quadrimestrale a cura della Rai

Indice

La televisione digitale terrestre: un'opportunità per il nostro Paese

dr. Mario Cominetti
Consulente Rai e già Vice Direttore del Centro Ricerche Rai

Sommario

Lo scenario televisivo europeo sta evolvendo rapidamente con l'introduzione della tecnologia digitale sui vari media – satellite, terrestre, cavo, reti a larga banda – adottando gli standard sviluppati dal DVB (Digital Video Broadcasting). In questo contesto la televisione digitale terrestre (DTT) si candida a diventare, nel medio e lungo termine, la forza trainante di un mercato di massa che potrà integrare ed estendere l'offerta dei canali satellitari e via cavo, soddisfacendo globalmente le diverse tipologie dei servizi – nazionali, regionali e locali – e consentendo anche la ricezione con terminali portatili e mobili.

Il Libro Bianco dell'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni, la Legge n.66/2001 ed il Regolamento ad essa associato, definiscono il quadro normativo nazionale e identificano i "soggetti" del nuovo mercato (fornitore di contenuti, operatore di rete, fornitore di servizi), ponendo le premesse per il lancio della DTT nel nostro Paese attraverso una fase iniziale di sperimentazione.

Un ruolo centrale è assunto dalla disponibilità di ricevitori DTT economici e dotati di una piattaforma "aperta" alla evoluzione tecnologica e dei nuovi servizi: condizione essenziale per favorire lo sviluppo di un mercato orizzontale nell'interesse dell'utenza e degli operatori. La piattaforma DVB-MHP, multimediale e interattiva, soddisfa pienamente tali requisiti e risponde alle indicazioni della recente Direttiva del Parlamento europeo che interessa il nuovo quadro normativo dello scenario delle telecomunicazioni, della radiodiffusione e delle tecnologie dell'informazione.

La RAI, che già ha contribuito attivamente al Progetto DTT, in ambito al Comitato Nazionale per lo Sviluppo dei Sistemi Digitali costituito dall'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni, in ottemperanza alle disposizioni ed alle procedure definite nella normativa, si prepara ad estendere la sperimentazione sulla DTT ai vari aspetti: tecnologici, editoriali e di produzione dei contenuti, in modalità DVB-MHP, allo scopo di individuare i modelli di business per i nuovi servizi.

1. Introduzione

La rivoluzione digitale è il fattore dominante di uno scenario caratterizzato dalla convergenza fra i settori della radiodiffusione, delle telecomunicazioni e delle nuove tecnologie dell'informazione. Nel campo della radiodiffusione televisiva le specifiche tecniche dei nuovi sistemi sono sviluppate dal Consorzio europeo DVB (Digital Video Broadcasting), che raccoglie oggi più di 300 partner di oltre 30 Paesi, e sono adottate nell'intero contesto internazionale (figura 1). Tali specifiche, che una volta approvate dall'ETSI diventano standard europei, coprono globalmente tutti gli anelli della catena di diffusione digitale televisiva – mostrata in figura 2 – dalla generazione dei programmi alla distribuzione all'utente. I sistemi della famiglia DVB adottano come nucleo comune la codifica video MPEG-2, nel profilo MP@ML, che estende le prestazioni dell'algoritmo di compressione DCT sviluppato da RAI e Telettra alla fine degli anni '80.

La RAI, attraverso il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica (CRIT), ha direttamente contribuito alla definizione delle specifiche DVB, in particolare per quanto riguarda la televisione digitale da satellite (DVB-S) [1], sui canali di diffusio-

Fig. 1 - Diffusione degli standard televisivi digitali nel mondo

ne terrestri (DVB-T) [2], nelle reti in cavo condominiali (SMATV/MATV) [3] e nei sistemi di contributo via satellite (DVB-DSNG) [4].

Ma quali sono i fattori innovativi della tecnologia digitale? Sicuramente il miglioramento della qualità tecnica del prodotto televisivo – cioè l'immagine e il suono – con possibilità di evolvere verso l'alta definizione; ma soprattutto il drastico aumento dell'offerta di programmi grazie all'efficacia dell'algoritmo di compressione MPEG-2 che consente di raggruppare più programmi televisivi su un "blocco" (o multiplex) che viene poi irradiato sul canale di diffusione convenzionale: tipicamente da 4 a 8 programmi a seconda della capacità trasmissiva disponibile (20÷24 Mbit/s sui canali terrestri; 34÷38 Mbit/s sui canali satellitari). La possibilità di ricevere con apparati portatili e servire anche l'utenza mobile (negli autobus, nei treni, ecc.), su base nazionale, regionale e locale, sono altri fattori premianti. Queste significative innovazioni tecnologiche aprono nuovi scenari di mercato, dove l'utente potrà accedere ad una vasta e diversificata offerta di servizi televisivi, generalisti e tematici, in chiaro e pay, multimediali e interattivi. Ne consegue un cambio radicale di cultura che interessa globalmente l'intera catena del valore ed introduce nuove modalità di produzione e fruizione dell'informazione televisiva.

Fig. 2 - Tipica catena di diffusione digitale multi-programma DVB

L'interattività sarà molto probabilmente la chiave del successo del futuro servizio televisivo, specie nei mercati caratterizzati da una ricca offerta competitiva tra operatori e piattaforme distributive.

Un ruolo importante sarà assunto dal quadro di regolamentazione all'interno del quale le imprese si troveranno ad operare. Sul piano normativo nazionale, importanti passi sono stati effettuati nell'ultimo quinquennio a partire dalla emanazione della Legge n.249/1997 che ha istituito l'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni ed ha affrontato per la prima volta le problematiche relative alla conversione del sistema radiotelevisivo terrestre dalla tecnologia analogica a quella digitale. La Legge n. 66/2001, del 20 marzo 2001, ed il Regolamento per la introduzione della DTT approvato dalla Autorità il 21/11/2001, danno certezza al quadro normativo e pongono le premesse per l'avvio dei nuovi servizi attraverso una fase iniziale di sperimentazione.

Nell'articolo, viene effettuata una analisi del percorso evolutivo della televisione digitale nel contesto europeo, dalla introduzione dei primi servizi via satellite fino ai giorni nostri, dove si assiste – sul piano

istituzionale e tecnologico – ad una intensa attività mirata a promuovere soluzioni "aperte" per la fruizione dei nuovi servizi dell'era digitale.

Si illustrano quindi gli elementi principali della normativa italiana sulla DTT e le tappe di riferimento del processo di conversione dal mondo analogico a quello digitale, con particolare attenzione alle prospettive offerte dalla nuova tecnologia agli operatori del settore ed agli utenti.

2. Lo scenario del broadcasting digitale

L'introduzione della televisione digitale negli standard DVB, iniziata in Europa nel 1994 con la diffusione diretta da satellite (DTH), sta cambiando profondamente gli scenari della comunicazione e del mercato [5]. Si stima oggi che oltre 22 milioni di utenti, pari a circa il 72% dell'intero mercato della televisione digitale, acceda ai nuovi servizi distribuiti dai canali satellitari di Eutelsat e Astra, attraverso sistemi di ricezione individuali, installazioni comunitarie condominiali e grandi reti in cavo.

Questi nuovi servizi sono stati introdotti prevalentemente dagli operatori pay secondo una strategia di "mercato verticale" che assicura all'operatore il controllo dell'intera catena del valore, dalla codifica in MPEG-2 dei contenuti audio/video alla messa in onda del "bouquet di programmi" sui canali distributivi, ed allo stesso ricevitore d'utente. Si sono così sviluppati, sin dalla fase iniziale, sistemi di accesso condizionato (CA) "proprietari" che il DVB, nello sviluppo della normativa per il satellite e il cavo, non aveva previsto.

Il Simulcrypt e il Multicrypt sono le ben note soluzioni tecniche proposte a tutela dei diritti dell'utenza nell'accesso a tali servizi. Nel Simulcrypt gli operatori si accordano per trasmettere nel proprio bouquet anche le chiavi di accesso dell'altro sistema CA, consentendo così l'uso di un unico ricevitore – dell'una o dell'altra piattaforma – per accedere all'offerta dei due operatori; è questo il caso delle trasmissioni via satellite dei servizi in abbonamento di Telepiù/D+ e Stream, effettuate in ottemperanza alle disposizioni della Legge n.78/1999 per il "decoder unico" . Nel Multicrypt l'accesso ai diversi servizi pay è consentito dall'impiego nel ricevitore dell'"interfaccia comune" standardizzata dal CENELEC (EN 50221): una soluzione avanzata che consiste nel portare il sistema di accesso condizionato proprietario su un modulo CA esterno al ricevitore ed inserito in esso attraverso un connettore PCMCIA.

Oltre all'accesso condizionato, altri due elementi caratteristici delle piattaforme digitali hanno influito sull'utilizzazione aperta della normativa DVB, nei servizi e nei terminali riceventi, di fatto frenando lo sviluppo del mercato: l'Electronic Programme Guide (EPG), la guida elettronica che indirizza l'utente alla scelta del programma all'interno del palinsesto, e l'Application Programming Interface (API), il middleware del ricevitore che interagisce con il sistema operativo per interpretare e visualizzare le applicazioni. Questi elementi, essenziali per introdurre servizi interattivi/multimediali ed oggetto di soluzioni proprietarie (MediaHighway, OpenTV, ecc.), si sono in pratica tradotti in strumenti destinati a stabilire barriere tecnologiche alla libera scelta dei servizi pay a cui abbonarsi, favorendo l'instaurarsi di posizioni dominanti, oltre ad ostacolare lo sviluppo del mercato "consumer" dei ricevitori a causa del disorientamento generato nell'utenza.

Sotto la spinta del nuovo mercato, caratterizzato dall'offerta di prodotti e servizi multimediali e interattivi, la scelta di una soluzione comune e "aperta" alla evoluzione tecnologica, appare quindi come condizione essenziale per il successo del broadcasting digitale nel contesto europeo.

Lo standard DVB-MHP (Multimedia Home Platform) è stato sviluppato per soddisfare tali requisiti [6]. Si tratta di una piattaforma aperta all'utilizzo da parte di ogni soggetto a condizioni eque di fruizione dei diritti di proprietà intellettuale, indipendente dal sistema di accesso condizionato ed in grado di garantire l'interoperabilità tra prodotti, servizi e termi-

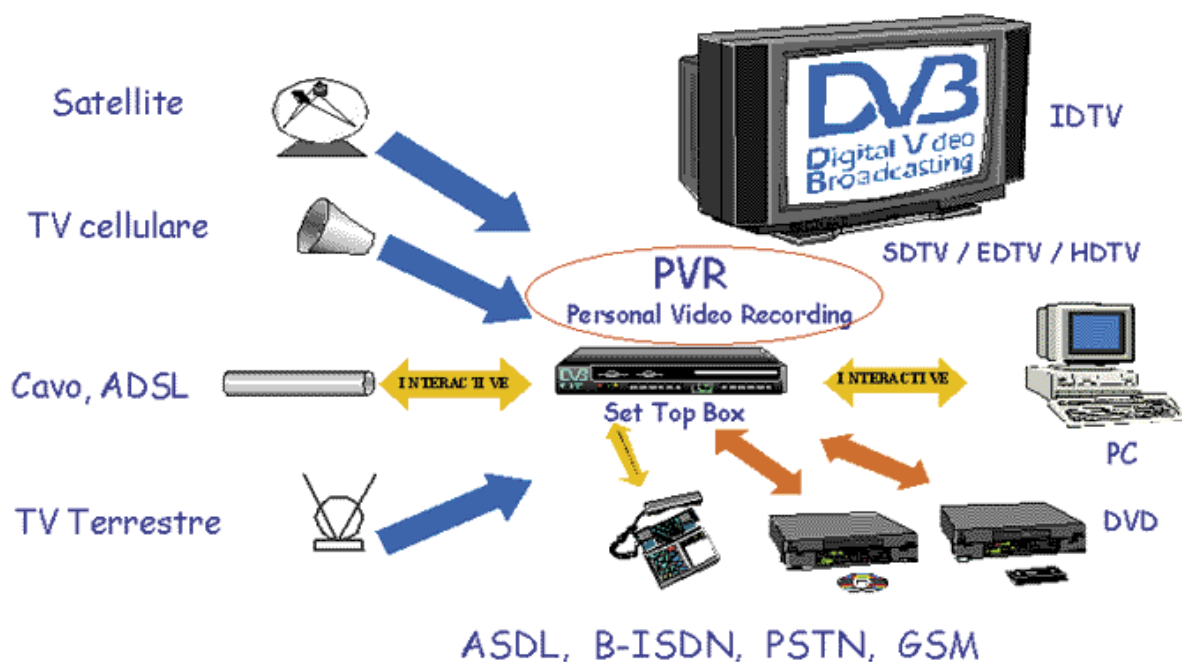



Fig. 3 - Piattaforma multimediale domestica DVB-MHP

nali. MHP è una piattaforma evoluta che tutela gli investimenti dei fornitori di contenuti e servizi, dei produttori di ricevitori e della stessa utenza, ed offre concrete prospettive di sviluppo di un mercato “orizzontale” sui vari media: satellite, terrestre, cavo, reti a larga banda.

La normativa MHP lascia piena libertà alle specifiche implementazioni del terminale d’utente – SetTopBox, TV digitale integrato, PC multimediale – da un profilo medio-basso a quello più elevato; ciò allo scopo di concedere a tutti gli operatori la massima libertà possibile nel perseguire i propri modelli commerciali.

Sebbene l’ultima e definitiva parola sul destino del MHP dovrà essere pronunziata dal mercato, l’attività svolta dal DVB nella definizione dello standard ha stimolato in misura significativa l’innovazione tecnologica in diversi settori industriali, consolidando il principio che l’espansione e l’integrazione dei mercati sia possibile attraverso l’armonizzazione delle tecnologie utilizzate, e della sostituzione progressiva di quanto è proprietario con standard aperti e accessibili secondo una politica di equità.

2.1 La Piattaforma Multimediale Domestica

Lo sviluppo della tecnologia digitale va trasformando il ricevitore domestico tradizionale – il televisore – in un terminale intelligente con capacità di elaborazione e memorizzazione sempre più vicine a quelle di un computer multimediale, in grado di effettuare vere e proprie transazioni commerciali (acquisto/vendita di beni materiali e/o finanziari) collegate ai classici annunci pubblicitari.

Il ricevitore sembra così destinato a collocarsi al centro di una piattaforma multimediale domestica DVB-MHP in un ambiente di “home-entertainment” dove i vari dispositivi periferici sono interconnessi in rete locale (figura 3).

La parte vitale dello standard DVB-MHP è l’interfaccia API; essa si basa sul linguag-

gio "Java™", il linguaggio di programmazione universale che, attraverso la Java Virtual Machine, assicura l'indipendenza dall'hardware ed impone requisiti minimi di memoria nel ricevitore. Ciò consente l'interoperabilità e la scalabilità, ossia la possibilità di realizzare funzioni e applicazioni compatibili con le prestazioni delle diverse soluzioni tecnologiche.

Un accordo con Sun Microsystems, detentore dei brevetti Java™, consente al DVB di mantenere il controllo della specifica, garantendo la compatibilità verso il basso con l'eventuale evoluzione di Java™.

Lo standard MHP definisce tre principali tipologie:

- Il profilo Enhanced Broadcasting che arricchisce il servizio televisivo tradizionale con contenuti multimediali, scaricati via etere nella memoria del ricevitore, eventualmente sincronizzati con il programma in onda, e con possibilità per l'utente di interagire localmente (interattività locale);
- Il profilo Televisione Interattiva che aggiunge al precedente la possibilità per l'utente di accedere a servizi on-demand tramite un canale di ritorno (interattività on-line);
- Il profilo Accesso a Internet che consente di ricevere contenuti Web attraverso il canale diffusivo e/o le reti PSTN/ISDN e memorizzarli nel terminale d'utente; è prevista l'interazione fra servizi Internet e Broadcasting.

I tre profili suddetti consentono di soddisfare globalmente le richieste del mercato in un'ottica di evoluzione compatibile, arricchendo i servizi televisivi di base con una grande varietà di applicazioni: IP multicasting, streaming audio-video di news, film, eventi sportivi, Teletext avanzato, EPG evoluta, giochi, pubblicità interattiva, t-commerce, home-banking, servizi on-demand, ecc. Particolarmente interessanti nella fase di lancio dei servizi DTT sono i profili Enhanced Broadcasting e Televisione Interattiva.

La flessibilità della specifica MHP consente quindi lo sviluppo di terminali d'utente con potenzialità crescenti: dallo "zapper" di base al terminale interattivo. La disponibilità dell'hard-disk, nei ricevitori più evoluti, permetterà di aumentare le funzionalità nell'accesso ai nuovi servizi consentendo all'utente la fruizione personalizzata dei programmi (PVR, Personal Video Recording) attraverso la creazione in locale di un vero e proprio palinsesto. I principali costruttori stanno già immettendo sul mercato ricevitori di nuova generazione, equipaggiati di hard-disk con capacità variabile da 20 GB a 60-80GB, orientati ad un mercato medio-alto; alcuni dispongono inoltre di un "doppio sintonizzatore", che consente all'utente di memorizzare (fuori linea) un determinato programma contemporaneamente alla normale fruizione del programma televisivo selezionato. Queste funzioni avanzate, tipiche dei PC multimediali, sembrano destinate a sostituire in prospettiva il registratore televisivo domestico.

La prossima versione dello standard MHP permetterà di sfruttare appieno la funzionalità PVR. Nasce, in questo contesto, l'esigenza di salvaguardare i "copyright" sui contenuti, tutelando i produttori contro la duplicazione non autorizzata del materiale che, grazie alla codifica digitale, risulta disponibile all'utente con la stessa qualità di sorgente. Questo problema, già emerso nel caso del DVD, è attualmente allo studio del DVB.

L'impiego su scala europea della piattaforma aperta MHP, permetterà una potenziale riduzione dei costi di produzione dei programmi di TV digitale interattiva grazie

alla possibilità di riutilizzare gli stessi contenuti in un mercato globale; ne deriva un aumento del valore del prodotto che porterà benefici agli operatori del settore.

L'offerta di questi nuovi servizi richiede lo sviluppo di applicazioni software basate su tecnologia Java™, la cui padronanza è oggi esclusivamente in possesso di personale altamente specializzato. Un problema che si pone agli operatori dei nuovi servizi, nella fase iniziale, è di investire in risorse umane con questo tipo di professionalità, di taglio prettamente informatico, al fine di disporre di una piattaforma di produzione dei contenuti autonoma in tecnologia Java™ oppure, non intendendo allocare investimenti ingenti in mancanza di una chiara percezione dei possibili ritorni, affidarsi a soluzioni in out-sourcing che però comportano il rischio di perdere il controllo del servizio appaltato in realizzazione e gestione a terzi. Tuttavia, va sottolineato che cominciano ad essere disponibili sul mercato dei "tools di authoring" che consentono di produrre applicazioni MHP anche senza una specifica conoscenza del linguaggio Java™. In ogni caso, dovranno essere adottate le necessarie procedure di validazione dell'applicazione prodotta (autenticazione) secondo la normativa MHP prima di immetterla sul canale di distribuzione.

Fig. 4 - Migrazione verso la piattaforma multimediale DVB-MHP

2.2 Migrazione verso la piattaforma MHP

Le prospettive di successo del processo di migrazione verso la piattaforma DVB-MHP sono condizionate da vari fattori: tecnici, commerciali e all'esistenza o meno sul mercato di servizi operativi che impiegano soluzioni API proprietarie. I principali produttori di tali sistemi – "Canal Plus", "Open TV" e "Liberate" – sostengono pubblicamente di appoggiare la soluzione DVB-MHP (figura 4). Tuttavia, come queste dichiarazioni si traducano in pratica in una politica commerciale merita una più attenta valutazione.

Nel caso di "Canal Plus" e "Open TV", i nuovi ricevitori sarebbero in grado di ricevere e interpretare sia le applicazioni MHP che quelle proprietarie attraverso l'impiego di un "interprete MHP" più complesso che opera all'interno degli ambienti proprietari MediaHighway (di Canal Plus) o Open TV.

"Liberate", partendo dalla propria soluzione proprietaria, incentrata sull' HTML, intenderebbe entrare nel mondo MHP attraverso il profilo Accesso a Internet che è basato sull' HTML.

Non è chiaro comunque se le soluzioni sopra indicate porteranno allo sviluppo di ricevitori pienamente compatibili con la normativa MHP e fra loro interoperabili, consentendo l'effettivo sviluppo di un mercato orizzontale.

Un caso particolare è rappresentato da MHEG-5, lo standard "pubblico" impiegato in Gran Bretagna nei servizi di televisione digitale terrestre lanciati nel novembre 1998, prima cioè che il DVB definisse le specifiche MHP. A quell'epoca, l'introduzione di applicazioni avanzate – interattive e multimediali – non era ritenuta prioritaria sul piano commerciale dai vari operatori

e la soluzione MHEG-5 era considerata adeguata alle richieste del mercato. Anche se nettamente inferiore all'MHP, in termini di prestazioni, MHEG-5 presenta alcuni punti in comune, come il formato dei dati per il "carousel DSM-CC" – impiegato nella distribuzione ciclica di prodotti multimediali attraverso il canale diffusivo – che potrebbe facilitare la transizione da un sistema all'altro.

I Paesi Nordici, raggruppati nel Consorzio NorDig DTT [7], che raccoglie ben 24 Enti, hanno definito una strategia per lo sviluppo della TV interattiva sulle reti di diffusione terrestri basata sull'impiego dell'MHP già nella fase di lancio dei nuovi servizi (è questo il caso della Finlandia); essa prevede inoltre la progressiva migrazione all'MHP dei servizi esistenti (è questo il caso della Svezia).

Altri operatori hanno già annunciato piani di utilizzazione dell'MHP nel contesto internazionale: un importante consorzio tedesco (ARD, ZDF, RTL, DLM, Kirch-Gruppe), Cable Labs (USA), Australia (FACTS), Corea (SkyLife), Cina (Shenzen Cable TV).

Le posizioni dei vari operatori e dei vari Paesi lasciano intravedere uno scenario evolutivo del broadcasting digitale verso il mondo dell'interattività e della multimedialità difficilmente prevedibile; tuttavia, a seconda delle situazioni nazionali, si possono individuare due principali linee di indirizzo.

Dove già esistono servizi operativi che impiegano sistemi proprietari con larga diffusione del parco ricevitori, il processo di migrazione potrebbe essere affrontato con l'immissione sul mercato dei ricevitori MHP e la trasmissione in "simulcast" delle applicazioni generate secondo le due piattaforme, consentendo in tal modo la fruizione del servizio anche agli utenti tradizionali. Si ricorda che il simulcast delle applicazioni ha alcune similitudini con il Simulcrypt dei messaggi di accesso condizionato (Seca e NDS) diffusi via satellite da Telepiù/D+ e Stream in conformità alle disposizioni vigenti in Italia per il "decoder unico" (Legge n. 78/1999).

Date le superiori capacità potenziali dell'MHP, il parco dei nuovi ricevitori dovrebbe aumentare progressivamente fino a diventare predominante, determinando una progressiva contrazione del mercato dei vecchi ricevitori. Questo scenario implica tuttavia uno spreco di banda per il fornitore del servizio, durante la fase di simulcast, ed un aumento dei costi di produzione dei contenuti e di gestione delle due piattaforme.

Una soluzione alternativa al simulcast, considerata in Gran Bretagna da BBC e ITV (già OnDigital) per i servizi DTT, prevede lo sviluppo di ricevitori MHP in grado di ricevere anche le applicazioni MHEG-5 attraverso una opportuna interfaccia (plug-in). Il plug-in è un componente software installato nel terminale ricevente allo scopo di rendere compatibili i prodotti di una tecnologia preesistente con la nuova piattaforma.

Considerando l'attuale limitata offerta di applicazioni interattive/multimediali in MHEG-5 questa linea evolutiva verso l'MHP sembra offrire concrete prospettive di sviluppo, salvo verificare l'impatto sul costo del ricevitore.

Dove ancora non esistono servizi operativi, o il parco di ricevitori dei sistemi proprietari in possesso dell'utenza è limitato, la soluzione naturale è quella di adottare la piattaforma DVB-MHP sin dalla fase di lancio dei nuovi servizi. I vantaggi sono evidenti: potendosi operare su una piattaforma unica è possibile contenere i costi di produzione dei contenuti e di gestione

del servizio, favorendo lo sviluppo di un mercato orizzontale attraverso la competizione fra i costruttori dei ricevitori. Questa scelta sembra la più conveniente per il lancio dei servizi di televisione digitale terrestre nel nostro Paese.

3. Il quadro istituzionale europeo

Il Parlamento Europeo sta elaborando una Direttiva che copre globalmente il nuovo quadro normativo dello scenario delle telecomunicazioni, della radiodiffusione, dei media e delle tecnologie dell'informazione, con particolare attenzione all'accesso alle reti e ai servizi di comunicazione elettronica ed al servizio universale. Fra le varie proposte, un tema importante riguarda l'impiego di una interfaccia aperta (ad es. la common Interface DVB) nei ricevitori digitali immessi sul mercato a partire dal gennaio 2002, che consenta la connessione di dispositivi periferici e l'accesso a servizi criptati attraverso l'utilizzazione di moduli CA esterni al ricevitore.

Un secondo obiettivo della Direttiva quadro è assicurare l'interoperabilità dei servizi e dei terminali nel mercato della televisione digitale interattiva a tutela dell'utenza e degli operatori del settore. A questo scopo si incoraggia l'utilizzo, nei nuovi servizi, di soluzioni API ed EPG aperte e si promuovono le iniziative volte a favorire il passaggio dalle attuali soluzioni proprietarie a quelle aperte, attraverso l'emanazione di "Memoranda of Understanding" sottoscritti dai vari operatori.

In questo contesto, lo standard DVB-MHP assume una grande valenza strategica in particolare nei Paesi, come l'Italia, che si apprestano ad introdurre la televisione digitale terrestre senza i vincoli di piattaforme proprietarie già esistenti.

L'utilizzazione di tale standard è fortemente sostenuta dall' MHP Action Group – costituito nel settembre 2001 su iniziativa di DigiTAG, EBU, EICTA (ex EACEM) – che raccoglie i principali attori dello scenario televisivo europeo della radiodiffusione e dell'elettronica di consumo. Il Memorandum of Understanding (MoU), prodotto dall'Action Group, evidenzia l'importanza strategica dell'interattività nel futuro scenario della televisione digitale e raccomanda l'impiego dello standard MHP nei nuovi servizi di televisione digitale interattiva per garantire l'interoperabilità dei prodotti e dei terminali e superare la frammentazione del mercato dovuta ai sistemi proprietari.

4. La televisione digitale terrestre in Europa

Nel quadro del futuro sistema radiotelevisivo la televisione digitale terrestre (DTT) è destinata a svolgere un ruolo centrale a motivo della sua facilità ed economicità di ricezione ed alla "universalità" del servizio stesso. Essa costituisce forse la più importante innovazione tecnologica nella storia della televisione, ancora più del colore e della diffusione via satellite, ed è destinata a rivoluzionare l'intero sistema televisivo italiano nonché l'attuale scenario della domanda e dell'offerta. Essa offrirà alla grande utenza ed agli operatori del settore significativi vantaggi e nuove opportunità:

- aumento sostanziale e diversificazione dell'offerta (4÷5 programmi per canale r.f.);
- interattività e multimedialità;
- elevata qualità di ricezione anche con terminali portatili e possibilità di servire l'utenza mobile;
- diverse tipologie di servizi: su base nazionale, regionale e locale;

- sfruttamento ottimale dello spettro di frequenza con possibilità di introdurre reti a singola frequenza (SFN) oltre alle reti convenzionali multi-frequenza (MFN);
- ricezione negli impianti condominiali in cavo con costi marginali per l'utente.

La figura 5 illustra le caratteristiche e le funzionalità peculiari della televisione digitale terrestre mentre le figure 6 e 7 mostrano, rispettivamente, le tipiche architetture delle reti SFN e MFN. Nelle reti SFN tutti i trasmettitori operano sulla stessa frequenza e contribuiscono a determinare l'area di copertura totale; questa modalità operativa è consentita dalle particolari prestazioni della modulazione digitale multi-portante COFDM – che sta alla base dello standard DVB-T – che consente di operare su un canale di diffusione terrestre affetto da propagazione multicammino imputabile agli echi dovuti ai segnali provenienti dai vari trasmettitori isofrequenziali della rete [2], [8]. Nelle reti MFN, che caratterizzano l'attuale servizio televisivo analogico, ciascun trasmettitore impiega una frequenza diversa (C1, C2,…Cn) e quindi opera in modo indipendente e con una sua propria copertura; è ovviamente possibile riutilizzare le stesse frequenze purchè gli impianti di diffusione siano sufficientemente lontani onde evitare possibili interferenze reciproche.

In un'ottica di medio-lungo termine, quando il processo di conversione dall'analogico al digitale si avvicinerà alla fase di regime e si renderanno disponibili in Italia adeguate risorse spettrali, sarà possibile prevedere anche l'introduzione di servizi DTT orientati all'utenza mobile che si affiancheranno ai servizi di telecomunicazione della terza generazione (GPRS e UMTS), allargando lo scenario delle comunicazioni mobili terrestri (figura 8).

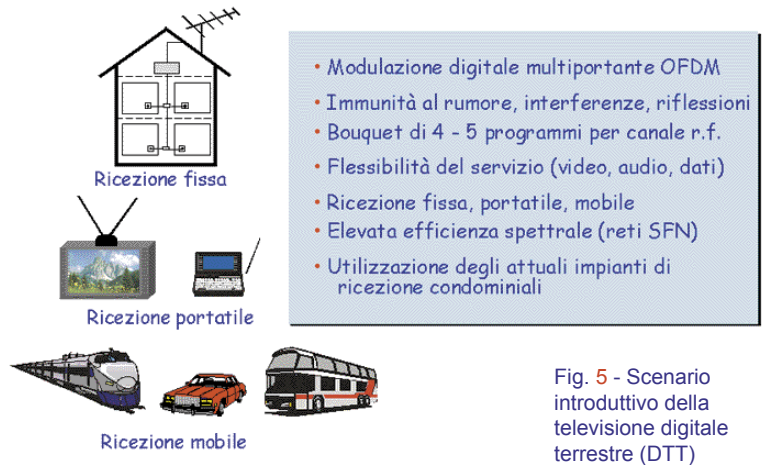



Fig. 5 - Scenario introduttivo della televisione digitale terrestre (DTT)

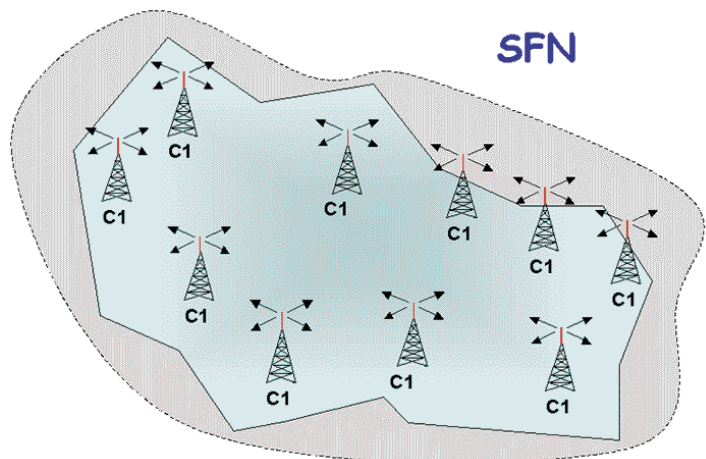



Fig. 6 - Configurazione e copertura di una rete televisiva digitale a singola frequenza (SFN)

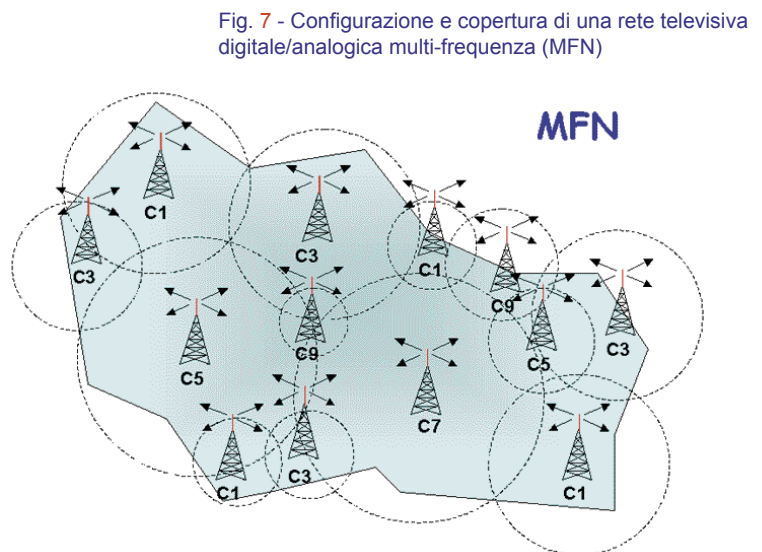



Fig. 7 - Configurazione e copertura di una rete televisiva digitale/analogica multi-frequenza (MFN)

Lanciata nel novembre 1998 in Gran Bretagna, la DTT è ormai parte integrante del nuovo assetto del mercato radiotelevisivo con servizi in chiaro e a pagamento offerti da BBC e ITV. Introdotta successivamente in Svezia e in Spagna, si candida a diventare nel medio e lungo termine la forza trainante di un mercato di massa di portata europea, in grado di estendere l'offerta dei servizi informativi di base con nuovi servizi interattivi e multimediali.

In Spagna il servizio lanciato da Quiero TV, che adotta la soluzione API proprietaria Open TV, sembra tuttavia incontrare difficoltà sul piano commerciale nella competizione con i servizi via satellite di CanalSateliteDigital e ViaDigital; la necessità di arricchire l'offerta con l'interattività e la multimedialità, nonché l'evoluzione del quadro europeo verso la piattaforma aperta DVB-MHP, hanno creato una situazione di incertezza che ha frenato lo sviluppo del mercato.

Una simile iniziativa lanciata in Svezia nell'aprile 1999, e che utilizza OpenTV, è attualmente congelata in vista di passare alla piattaforma MHP adottata dal Consorzio NorDig DTT al quale i vari operatori svedesi aderiscono.

Fig. 8 - Scenario evolutivo delle comunicazioni digitali terrestri

In Finlandia il lancio della DTT su vasta scala è pianificato per la seconda metà del 2002 allorchè saranno disponibili sul mercato i ricevitori MHP promossi da NorDig DTT.

In gran parte degli altri Paesi europei, fra i quali l'Italia, la Francia, la Germania e l'Olanda, sono in corso varie sperimentazioni DTT di carattere tecnico, commerciale e pre-operativo. E' importante segnalare che in Germania è stato formulato un piano per l'introduzione a breve del primo servizio DTT rivolto anche all'utenza mobile nell'area di Berlino.

L'impatto della TV digitale terrestre nel contesto europeo è attualmente limitato alla Gran Bretagna, alla Spagna e alla Svezia, dove esistono veri e propri servizi operativi; in termini di incidenza sul mercato globale del broadcasting digitale tale impatto si colloca intorno al 6%, contro il 72% del satellite e il 22% del cavo. Si prevede però che già nel corso del 2002 il lancio dei primi servizi operativi in Finlandia possa dare un significativo impulso alla diffusione della DTT.

5. Il contesto nazionale

In Italia la televisione digitale si è sviluppata via satellite con una ricca offerta di canali generalisti e tematici in gran parte a pagamento. Attualmente sono oltre 4 milioni le parabole installate, con un parco di ricevitori di oltre 2,5 milioni di unità. La conversione del sistema radiotelevisivo dall'analogico al digitale in atto nel contesto europeo è una tappa necessaria ed essenziale anche per il nostro Paese per l'avvio di un progetto globale che consenta di accrescere la competitività sui mercati

internazionali e garantisca positive ricadute sul comparto occupazionale interno. Su queste linee strategiche si è mossa l'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni che, secondo le indicazioni della Legge n. 249 del 31 luglio 1997, ha pubblicato nel settembre 2000 il "Libro Bianco" sulla televisione digitale terrestre [9] nel quale si individuano gli scenari per l'introduzione della DTT in Italia.

La "Legge n.66/2001", approvata il 20 marzo 2001, delinea il passaggio in tempi rapidi – nel quinquennio 2002-2006 – del sistema televisivo italiano dal regime analogico al regime digitale e richiede alla Autorità l'attuazione entro il 31/12/2002 del Piano Nazionale di assegnazione delle frequenze in tecnica digitale, che costituirà lo strumento essenziale per rendere disponibili le necessarie risorse in frequenza nella attuale situazione di occupazione caotica dello spettro nelle bande di radiodiffusione terrestre VHF/UHF.

Un ruolo cruciale assume il "Regolamento sulla DTT", approvato dall'Autorità il 21 novembre 2001, che definisce le norme di applicazione di quanto specificatamente previsto dalla Legge n.66/2001 per l'introduzione della nuova tecnologia attraverso una fase transitoria di sperimentazione.

La Legge n. 66/2001 e il Regolamento definiscono anche il quadro normativo per la radiofonia digitale (DAB) che però esula dall'analisi condotta nel presente articolo.

5.1 Il Libro Bianco

Il Libro Bianco sul digitale terrestre è il risultato dell'attività del Comitato per lo sviluppo dei sistemi digitali, istituito il 25 novembre 1998 dalla Autorità allo scopo di definire obiettivi, condizioni e modalità per lo sviluppo in Italia della tecnologia digitale e dei nuovi servizi. Il Comitato, attraverso quattro Gruppi di lavoro, ha esaminato le tematiche di rilievo: requisiti di servizio e standard di qualità (Gruppo A), architettura delle reti e numero dei programmi (Gruppo B), standard del decoder e problematiche industriali (Gruppo C), proposte operative per l'avvio della DTT (Gruppo D). Il Gruppo di studio E, infine, ha coordinato ed armonizzato i risultati degli altri quattro Gruppi.

Una importante attività ha riguardato lo studio dei possibili scenari operativi per lo sviluppo della DTT sulla base di una serie di ipotesi legate al reperimento delle risorse in frequenza; particolare attenzione è stata data alla fase iniziale del processo di transizione dall'attuale sistema analogico a quello "tutto digitale" individuando due scenari operativi:

Scenario A basato sull'attuazione del Piano Nazionale di Assegnazione delle Frequenze (PNAF) che l'Autorità dovrebbe definire entro il 2002. Il Piano Nazionale del 1997, seppure focalizzato sulla televisione analogica, già riservava 4 frequenze alla televisione digitale terrestre, in particolare il canale 9 in banda VHF ed i canali 66, 67, 68 in banda UHF. Tali frequenze sono però attualmente utilizzate dalle reti televisive analogiche e potranno, presumibilmente, essere disponibili per il digitale terrestre solo dopo l'attuazione del PNAF o nel corso di attuazione dello stesso; comunque non prima di 4-5 anni.

Scenario B basato su uno schema di sviluppo a "macchia di leopardo" che, prescindendo dai tempi per l'attuazione del PNAF, meglio si presta, rispetto allo scenario A, ad accelerare i tempi di avvio della fase di transizione. Si tratterebbe infatti di introdurre il servizio digitale in quelle aree – in particolare i grandi centri urbani – dove già si rendono disponibili o è possibile reperire risorse in frequen-

za. Questo schema richiede tuttavia un attento coordinamento nell'utilizzazione delle frequenze da parte dell'Ente di regolamentazione per tendere a un modello definitivo di Piano digitale in grado di gestire in modo ottimale le frequenze utilizzabili inizialmente con quelle resesi disponibili successivamente.

Allo scopo di fornire alcune linee guida agli operatori del settore, il Libro Bianco riporta i risultati di alcuni esercizi di pianificazione della DTT effettuati con riferimento a possibili scenari introduttivi di servizi su base "nazionale" e " regionale".

Nel caso di un servizio nazionale – basato su un multiplex di 5 programmi televisivi oltre a servizi multimediali – sono state valutate le percentuali di popolazione servita su tutto il territorio ricorrendo a 3 diverse configurazioni di rete sia a singola frequenza (SFN) che multifrequenza (MFN). I risultati, relativi alla diffusione del segnale DVB-T in 64-QAM (rate 2/3; Tg=1/4; 8K) – una configurazione di trasmissione digitale che rende disponibile un bit-rate di circa 24 Mbit/s [2] – si possono così sintetizzare:

1-SFN (1 sola frequenza): si stima una copertura dell'87% impiegando 306 trasmettitori in banda III-VHF, oppure 391 trasmettitori in banda V-UHF;

3-SFN (3 frequenze): la copertura si estende al 97%, impiegando rispettivamente 430 e 460 trasmettitori nelle due bande di frequenza;

4-MFN (4 frequenze): si stima una copertura del 93%, impiegando rispettivamente 360 e 400 trasmettitori.

Il Libro Bianco indica inoltre, per un Piano digitale che utilizzi tutti i 55 canali delle bande VHF e UHF, una capacità potenziale di 13÷18 multiplex (o blocchi di diffusione) per area di servizio – a seconda che si adotti una configurazione di rete 4-MFN oppure 3-SFN – con possibilità di differenziare la programmazione a livello regionale/locale. In questo scenario "tutto digitale" si renderebbero disponibili da 40 a 90 programmi televisivi (arricchiti da applicazioni multimediali), a seconda della modalità di trasmissione (3 o 5 programmi per multiplex) e della configurazione di rete, suddivisi tra programmi a diffusione nazionale e programmi a diffusione regionale e locale relativi alle singole aree di servizio.

5.2 La Legge 66/2001 e il Regolamento sulla DTT

La Legge n. 66 del 20 marzo 2001, nata sulla scia del vecchio Ddl 1138, ispirandosi alle indicazioni del Libro Bianco definisce il quadro istituzionale per l'introduzione nel mercato italiano della tecnologia digitale terrestre e fissa al 31/12/2006 il definitivo passaggio dell'intero sistema televisivo dall'analogico al digitale. Questa data, sebbene da molti ritenuta troppo prossima per essere realisticamente rispettata, stante l'attuale occupazione dello spettro radioelettrico destinato alla diffusione televisiva terrestre, accelera di fatto l'avvio di un processo di investimenti e di sviluppo di un settore industriale strategico e pone la basi per una trasformazione radicale dell'intero sistema televisivo nazionale.

La Legge indica che su ciascun "blocco di diffusione" vengano irradiati almeno tre programmi televisivi, destinando la capacità rimanente a servizi multimediali. Raccomanda che l'Autorità nella predisposizione dei piani di assegnazione delle frequenze per la DTT adotti il criterio di migliore e razionale utilizzazione dello spettro radioelettrico prevedendo per i servizi nazionali l'impiego di reti isofrequenziali (SFN) su macro aree di diffusione.

Alla RAI, concessionaria del servizio pubblico radiotelevisivo, è riservato un blocco per la diffusione dei propri programmi televisivi DTT in chiaro. Su ulteriori blocchi di diffusione la concessionaria può operare, sia come fornitore di contenuti e servizi sia come operatore di rete, nel rispetto degli obblighi e delle procedure vigenti.

I soggetti operanti in ambito nazionale, ad eccezione della RAI, non possono differenziare il palinsesto dei loro programmi su base regionale o locale.

Il Regolamento sulla DTT introduce la distinzione fra i soggetti operanti nel nuovo mercato: il fornitore di contenuti, il fornitore di servizi e l'operatore di rete. I rispettivi compiti sono definiti nel pieno rispetto dei principi del pluralismo dell'informazione, di trasparenza, di tutela della concorrenza e di non discriminazione. Il fornitore di contenuti ha la responsabilità editoriale del palinsesto dei programmi; il fornitore dei servizi gestisce in particolare la configurazione del multiplex, l'accesso condizionato e l'EPG; l'operatore di rete provvede alla diffusione del segnale in conformità con le norme tecniche di emissione.

La conseguenza di questa scelta operata dal legislatore dovrebbe portare all'abbassamento delle barriere e dei costi all'ingresso, potendo ciascun operatore specializzarsi e concentrarsi sulla specifica attività che costituisce il proprio punto di forza.

Il lancio della DTT prevede una fase iniziale di sperimentazione. Le abilitazioni possono essere richieste dagli operatori televisivi, eventualmente riuniti in consorzi e con la partecipazione di editori di prodotti e servizi multimediali, fino al 30 marzo 2004. La validità delle abilitazioni cessa il 25 luglio 2005.

A partire dal 31 marzo 2004, i soggetti abilitati potranno richiedere al Ministero delle Comunicazioni la conversione della abilitazione in licenza di operatore di rete limitatamente ai bacini e alle frequenze per i quali erano titolari di abilitazione. A tal fine, dovranno assumere determinati impegni quali, ad esempio, investire in infrastrutture, promuovere accordi commerciali con i fornitori di servizi per agevolare l'utenza relativamente alla diffusione degli apparati riceventi, comunicare eventuali variazioni circa le aree interessate dalla sperimentazione, i siti prescelti per la diffusione e le frequenze utilizzate.

Analogamente, i fornitori di contenuti e di servizi (in chiaro e ad accesso condizionato) dovranno richiedere al Ministero delle Comunicazioni il rilascio delle rispettive autorizzazioni secondo le modalità previste dal Regolamento.

Il Regolamento definisce norme intese a favorire il pluralismo dell'informazione, allargando la partecipazione alla sperimentazione a tutti i soggetti che ne hanno i requisiti. Allo scopo i titolari di almeno due concessioni televisive analogiche hanno l'obbligo di riservare, in ciascun blocco (multiplex) di programmi e servizi, almeno il 40% della capacità trasmissiva alla sperimentazione di altri soggetti a condizioni eque, trasparenti e non discriminatorie.

Un terzo della capacità trasmissiva prevista dal PNAF, dovrà essere riservata ai soggetti titolari di autorizzazione alla fornitura di contenuti che operano in ambito locale.

Inoltre, ad uno stesso soggetto non potranno essere rilasciate autorizzazioni per irradiare, in chiaro o criptato, più del 20% dei programmi digitali nazionali, né gli sarà consentito di irradiare più di un blocco (multiplex) di programmi DTT su una stessa area, in ambito locale.

Il Regolamento, nella fase attuale, definisce solo linee normative di fondo intese a disciplinare gli aspetti essenziali del passaggio dal regime analogico a quello digitale; a successivi provvedimenti, che potranno essere emanati alla fine del periodo di sperimentazione, sarà lasciato il compito di determinare un più specifico quadro normativo adeguato all'evoluzione del sistema e del mercato.

5.3 Il terminale d'utente

Un importante elemento nel processo di conversione al digitale terrestre riguarda lo standard dei ricevitori. La normativa preliminare, elaborata a seguito delle indicazioni fornite dal Libro Bianco deriva da un largo consenso da parte dei costruttori e degli operatori del settore ed è riportata nella delibera 216/2000 dell'Autorità. Fra le funzionalità che più direttamente possono condizionare lo sviluppo di un mercato orizzontale, e per le quali si raccomanda una "soluzione aperta" a tutti i soggetti, si citano: il sistema di navigazione, la guida elettronica ai programmi (EPG) e l'interfaccia per le applicazioni (API). EPG ed API rappresentano il valore aggiunto dei nuovi ricevitori digitali per la fruizione dei servizi multimediali e interattivi. Lo standard elaborato non esclude possibili adeguamenti sulla base dei risultati della fase di sperimentazione.

Fig. 9 - Incremento di costo dei ricevitori digitali commerciali rispetto allo "zapper base"

Attualmente, nel contesto dei servizi di televisione digitale via satellite, la Legge n.78/1999 sul "decoder unico", consente agli utenti in possesso di decoder relativo ad uno dei due operatori – Telepiù/D+ e Stream – di ricevere anche l'offerta televisiva in abbonamento dell'altro operatore. Tuttavia, a causa dell'adozione di API proprietarie – MediaHighway e OpenTV – rimangono comunque inaccessibili, da parte di un dato decoder, tutti i servizi aggiuntivi – quali ad esempio l' EPG, i servizi interattivi e multimediali, la Pay-per-view, ecc. – forniti dalla piattaforma dell'altro operatore.

Sembra questo un motivo sufficiente per considerare l'importanza della piattaforma MHP quale standard aperto per tutti i futuri servizi televisivi digitali, satellitari e terrestri, e promuoverne l'impiego come piattaforma comune già nella fase di sperimentazione della DTT prevista dal Regolamento.

Per quanto riguarda la disponibilità dei terminali riceventi i principali produttori – Philips, Nokia, Panasonic, Sony, Grundig – hanno iniziato l'immissione sul mercato di prodotti MHP già a partire dal 2002. Gli stessi operatori, per verificare l'interoperabilità dei ricevitori, hanno costituito un "MHP Test Consortium" che opera in stretto contatto con un gruppo di lavoro del DVB, incaricato di validare la specifica tecnica MHP.

Sulla base di una recente indagine di mercato, i cui risultati sono sintezizzati in figura 9, il costo all'utente dei ricevitori MHP di prima generazione, in versione Enhanced Broadcasting, sarà confrontabile con quello dei ricevitori MediaHighway/Open TV;

entro il 2005 l'incremento di costo rispetto allo "zapper base" si posizionerà intorno a 20 ÷ 40 ECUs per le versioni Enhanced Broadcasting e Televisione Interattiva, rispettivamente.

6. Conclusioni

L'introduzione della televisione digitale terrestre rappresenta una tappa fondamentale del processo di conversione tecnologica dell'intero sistema radiotelevisivo nel nostro Paese. In questo contesto fortemente evolutivo, la DTT è destinata a svolgere un ruolo centrale a motivo della sua facilità ed economicità di ricezione, alla "universalità" del servizio stesso – prevalentemente rivolto alla grande utenza – ed alla possibilità di integrare e complementare l'offerta dei canali satellitari e via cavo, potendo soddisfare globalmente le diverse tipologie dei servizi: nazionali, regionali e locali. La possibilità di estendere la ricezione anche ai terminali portatili e, in prospettiva all'utenza mobile, è un altro fattore premiante.

Il quadro normativo nazionale, definito dalla Legge n.66/2001 e dal relativo Regolamento, conferisce stabilità al sistema e individua i meccanismi che, attraverso la fase iniziale di sperimentazione, promuovono il processo di conversione alla tecnologia digitale e lo sviluppo dei nuovi mercati. Tuttavia, il successo di questo ambizioso progetto sembra condizionato dal verificarsi di alcune condizioni:

la disponibilità delle risorse in frequenza e di ricevitori commerciali a costi accessibili;

il rapido avvio delle procedure di autorizzazione/licenza dei soggetti interessati;

l'emissione di provvedimenti legislativi a sostegno dell'utenza e degli operatori che investono nelle nuove infrastrutture.

Nello scenario fortemente competitivo che caratterizza il broadcasting digitale, in cui l'offerta televisiva sarà sempre più integrata con arricchimenti di carattere interattivo e multimediale, fondamentale è la convergenza di tutti i soggetti verso l'impiego di una piattaforma "aperta" sin dalla fase iniziale di sperimentazione, al fine di favorire lo sviluppo di un mercato orizzontale a beneficio degli operatori e degli utenti; la piattaforma DVB-MHP (Multimedia Home Platform) soddisfa tale requisito e, inoltre, risponde agli obiettivi della Direttiva del Parlamento Europeo intesa a garantire il servizio universale e il pluralismo dei media nel quadro della nuova società dell'informazione.

Varie sperimentazioni DTT sono da tempo in corso da parte di RAI – a Torino, Roma e Palermo – Mediaset e Telepiù/D+ su varie aree del territorio nazionale. La RAI, in particolare, attraverso il test-bed di Torino [10], [11], [12], si appresta a valutare globalmente le prestazioni della piattaforma DVB-MHP per servizi multimediali e interattivi, sia sul piano tecnologico e operativo che su quello editoriale e di produzione dei contenuti, con l'obiettivo di contribuire alla definizione dei requisiti di servizio e dei modelli di business.

Bibliografia

1. M. Cominetti, A.Morello: "Il sistema europeo (DVB-S) per la diffusione televisiva da satellite"; Elettronica e Telecomunicazioni n°3, 1994

2. V.Mignone, A.Morello, M.Visintin: "Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre"; Elettronica e Telecomunicazioni n°1, 2002

3. M.Cominetti, A.Polo, V.Sardella: "Una nuova soluzione per la distribuzione di segnali DVB negli impianti centralizzati d'antenna"; Elettronica e Telecomunicazioni n°2; 2000

4. V.Mignone, A.Morello: "Il nuovo standard DVB per il DSNG ed altri collegamenti di contributo via satellite"; Elettronica e Telecomunicazioni n°1; 2000

ACRONIMI	
API	Application Programming Interface
ATSC	Advanced Television Systems Committee
CA	Conditional Access
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DAB	Digital Audio Broadcasting
DCT	Discrete Cosine Transform
DigiTAG	Digital Terrestrial Action Group
DSM-CC	Digital Storage Media - Command and Control
DSS	Digital Satellite System (Hughes)
DTH	Direct-to-Home
DTT	Digital Terrestrial Television
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-C	DVB - cavo
DVB-S	DVB - satellite
DVB-T	DVB - terrestre
DVB-DSNG	DVB - Digital Satellite News Gathering
DVD	Digital Versatile Disc
EACEM	European Association of Consumer Electronics Manufacturers
EBU	European Broadcasting Union
EICTA	European Information, Communications and Consumer Electronics Industry
EPG	Electronic Programme Guide
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
GPRS	General Packet Radio Service
HTML	Hyper Text Mark-up Language
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISDB-T	Integrated Services Digital Broadcasting (Terrestrial)
MATV	Master Antenna TV
MFN	Multi Frequency Network
MHP	Multimedia Home Platform
MPEG	Motion Picture Expert Group
MP@ML	Main Profile@Main Level
OpenCable	Normativa CableLabs (USA)
PC	Personal Computer
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
PNAF	Piano Nazionale delle Frequenze
PSTN	Packet Switched Telephone Network
PVR	Personal Video Recording
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
r.f.	radiofrequenza
SFN	Single Frequency Network
SMATV	Satellite Master Antenna TV
UHF	Ultra High Frequencies
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Systems
VHF	Very High Frequencies

5. M.Cominetti: "Il broadcasting digitale". ASSINFORM Rapporto sull'Informatica e le Telecomunicazioni 2000; pagg. 217 ÷ 230

6. M.Cane; D.Gibellino: "Multimedia Home Platform: uno standard comune per servizi e terminali domestici"; Elettronica e Telecomunicazioni n°3; 2000

7. NorDig: "Digital Integrated Receiver Decoder Specification for use in cable, satellite and terrestrial networks"; NorDig I, version 1.3

8. CEPT: " The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the Introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T)"; Chester, July 1997

9. Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni: "Libro Bianco sulla televisione digitale terrestre"; Settembre 2000

10. M.Cominetti, A.Morello, R.Serafini: "Current plans for DTT implementation in a densely utilised frequency spectrum" ; Montreux TV Symposium, June 1999

11. P.B.Forni, S.Ripamonti, V.Sardella: "Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio"; Elettronica e Telecomunicazioni n°1, 2002.

12. A.Bertella, B.Sacco, M.Tabone: "Valutazione in laboratorio delle prestazioni del sistema DVB-T per la televisione digitale terrestre"; Elettronica e Telecomunicazioni n°1, 2002.

Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio

ing. Paolo Benvenuto **Forni,**
ing. Silvio **Ripamonti,**
ing. Vincenzo **Sardella**

Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

1. Introduzione

Nel quadro dell'attività rivolta all'introduzione dei futuri servizi televisivi digitali sulle reti terrestri (DVB-T) [1] il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della RAI (CRIT), in stretta collaborazione con RaiWay, ha avviato da tempo una sperimentazione, differenziata per aree geografiche e per servizi, i cui primi risultati sono stati presentati dalla RAI in ambito al Comitato Nazionale per lo sviluppo dei sistemi digitali costituito dall'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni [2], ed in ambito internazionale [3], [4].

Il primo esperimento pilota è stato avviato a Torino a partire dal febbraio 1998, con lo scopo principale di valutare sul campo le prestazioni del DVB-T, ponendo particolare attenzione alla capacità trasmissiva, alla qualità del servizio, al "bouquet" di programmi (audio, video, dati) offerti: sono questi i parametri che consentono di identificare la miglior configurazione di servizio in grado di interessare la più vasta utenza. Altre aree di sperimentazione sono state allestite a Roma e a Palermo, direttamente a cura di RaiWay; un secondo test-bed curato da RAI-CRIT e RaiWay è in fase di realizzazione in Valle d'Aosta.

L'articolo analizza le configurazioni delle reti pilota a Torino (canali 28 e 66) e in Valle d'Aosta (canale 64), con particolare attenzione ai parametri adottati per la codifica del segnale di sorgente e per la trasmissione; descrive sinteticamente i criteri per la stima della copertura del servizio, con riferimento ai metodi ed alle procedure adottati in ambito CEPT, sia per reti a singola frequenza (SFN Single Frequency Network) che per reti convenzionali multifrequenza (MFN Multi Frequency Network), avvalendosi di modelli propagativi avanzati integrati con modelli numerici del territorio; riporta le previsioni della copertura radioelettrica del servizio DVB-T sperimentale. Inoltre sono presentati i risultati di misure del campo elettromagnetico (e.m.) e della copertura percentuale eseguite nell'area torinese, con particolare riguardo alla ricezione fissa e in movimento su autoveicoli.

Sommario

L'articolo riporta i principali risultati della sperimentazione pre-operativa di televisione digitale terrestre (DVB-T) condotta nell'area pilota di Torino e illustra l'architettura della rete DVB-T in Valle d'Aosta che costituirà prossimamente una nuova area di sperimentazione della Rai.

La sperimentazione pre-operativa, descritta nell'articolo, ha permesso di effettuare valutazioni tecniche sulle effettive prestazioni del sistema DVB-T in area di servizio, focalizzate sulla ricezione fissa, portatile e mobile. Queste indagini, arricchite dai risultati di valutazioni tecniche effettuate in laboratorio [5] forniscono rilevanti informazioni sulle prestazioni del sistema DVB-T in vista dell'introduzione del servizio operativo.

2. Criteri di valutazione delle coperture

La copertura di un impianto o di una rete di impianti di diffusione viene calcolata suddividendo l'area geografica su cui opera il singolo impianto (o la rete) in un numero di zone (aree locali) sufficientemente elevato in modo da poter evidenziare la variazione spaziale del campo sull'area geografica considerata. E' necessario che tali zone siano sufficientemente piccole da potersi considerare statisticamente rappresentate in termini di campo elettrico ricevuto fornendone il valore in un punto dell'area (p. es. al centro) e la percentuale di tutte le possibili postazioni riceventi omogenee (p. es. tutte fisse) localizzabili nella singola area locale per cui tale valore risulta superato. Nel caso in cui la percentuale di superamento corrisponda al 50 %, il valore di campo calcolato corrisponde alla media dei valori di campo riscontrabili sulle locazioni nell'area.

La percentuale di locazioni riceventi appartenenti all'area locale per cui risulta superato il valore di campo minimo richiesto dal servizio di diffusione televisiva, è denominata "percentuale di località".

Dal momento che i sistemi a modulazione numerica sono caratterizzati da un'eccellente qualità ma subiscono un brusco degrado allorchè viene raggiunta la soglia di sensibilità del sistema, per essi si richiede una disponibilità del servizio (per località e per percentuale di tempo) superiore ai requisiti tipici della televisione analogica, per cui si specifica una disponibilità per il 50% del tempo e per il 50% delle località. Tipicamente per la televisione digitale terrestre [6] è richiesta la disponibilità per il 99% del tempo mentre la disponibilità per località viene differenziata secondo la qualità: una copertura è considerata buona se caratterizzata da una disponibilità per il 95% delle località, accettabile per disponibilità del 70%. Generalmente si preferisce assicurare una disponibilità per il 95% delle località nel caso di ricezione fissa con antenna direttiva sul tetto, ed accettare una disponibilità per il 70% delle località nel caso di ricezione portatile all'interno delle abitazioni.

La valutazione della copertura di un servizio diffusivo richiede quindi il calcolo preventivo del campo prodotto da uno o più impianti trasmittenti, in termini di campo minimo richiesto per soddisfare i requisiti di qualità tipici del servizio. La valutazione dovrebbe possibilmente avvenire considerando tutti gli effetti perturbanti presenti, quali attenuazioni da ostacoli ed interferenze.

Il calcolo della copertura di un impianto trasmittente avviene mediante algoritmi in grado di stimare il campo prodotto su un'area geografica predeterminata, note le caratteristiche del sistema radiante, ovvero l'ERP (Equivalent Radiated Power) irradiata nelle varie direzioni, e l'orografia dell'area attraverso una base dati altimetrica. Generalmente sono utilizzati metodi predittivi in grado di stimare la copertura nel 50% delle località; si considera servita un'area laddove sia stimato un campo e.m. a 10 m dal suolo derivato dal valore

Tabella 1 - Campo minimo richiesto per utilizzare metodi predittivi con stima nel 50% delle località nella valutazione dei servizi DVB-T				
Canale	Modulazione	$E_{min(a\ 10\ mt)}$ (50,50) [dB(μV/m)]	Ricezione	Disponibilità (% loc.)
64	64QAM; 8k; 2/3; 1/32	81	Portatile indoor piano terra	70
64	64QAM; 8k; 2/3; 1/32	57,3	Fissa sul tetto	95
66	64QAM; 8k; 2/3; 1/32	81	Portatile indoor piano terra	70
66	64QAM; 8k; 2/3; 1/32	57,5	Fissa sul tetto	95

Tab. 1 - Campo minimo richiesto per utilizzare metodi predittivi con stima nel 50% delle località nella valutazione dei servizi DVB-T

minimo del rapporto portante/rumore (C/N) specifico del sistema comprensivo di un margine di implementazione (ad es. C/N=17.1 dB + 3 dB nel caso di 64QAM 2/3). Il valore del campo e.m. richiesto va maggiorato da coefficienti correttivi statistici al fine di garantire valida la stima per la reale quota rispetto al suolo a cui si trova l'antenna ricevente e la percentuale di località per cui si intende garantire il servizio.

Nel caso di una rete a singola frequenza (SFN), in cui tutti gli impianti irradiano lo stesso programma sul medesimo canale, la copertura della rete può essere significativamente più estesa della somma delle coperture dei singoli impianti. Ciò avviene quando i vari contributi di segnale provenienti dai diversi impianti costituenti la rete giungono al ricevitore secondo percorsi che comportano ritardi inferiori all'intervallo di guardia tipico del modo adottato (variabili tra 28 e 224 ms) e danno luogo ad un livello di segnale complessivo di energia sufficiente a garantirne la ricezione con una qualità accettabile [7].

La stima della copertura di una rete SFN prevede il calcolo della copertura dei singoli impianti e la valutazione della copertura complessiva di rete mediante l'applicazione di un modello per la combinazione degli echi.

Dipendentemente dalla tipologia di servizio, variano la quota dell'antenna ricevente (tipicamente 10 m per la ricezione fissa con antenna direttiva sul tetto, ed 1,5 m per la ricezione mobile) e l'intensità di campo minimo richiesto al ricevitore (secondo la banda e le caratteristiche di modulazione adottate). La disponibilità del servizio è stabilita in sede di progetto a seconda della tipologia di ricezione preferenziale (fissa, portatile o mobile). In tabella 1 sono riportati i campi minimi richiesti alla quota di 10 m tali da assicurare il servizio DVB-T, in assenza di interferenza, per le disponibilità spaziali (70% e 95%) riportate alla quota di fruizione del servizio (piano

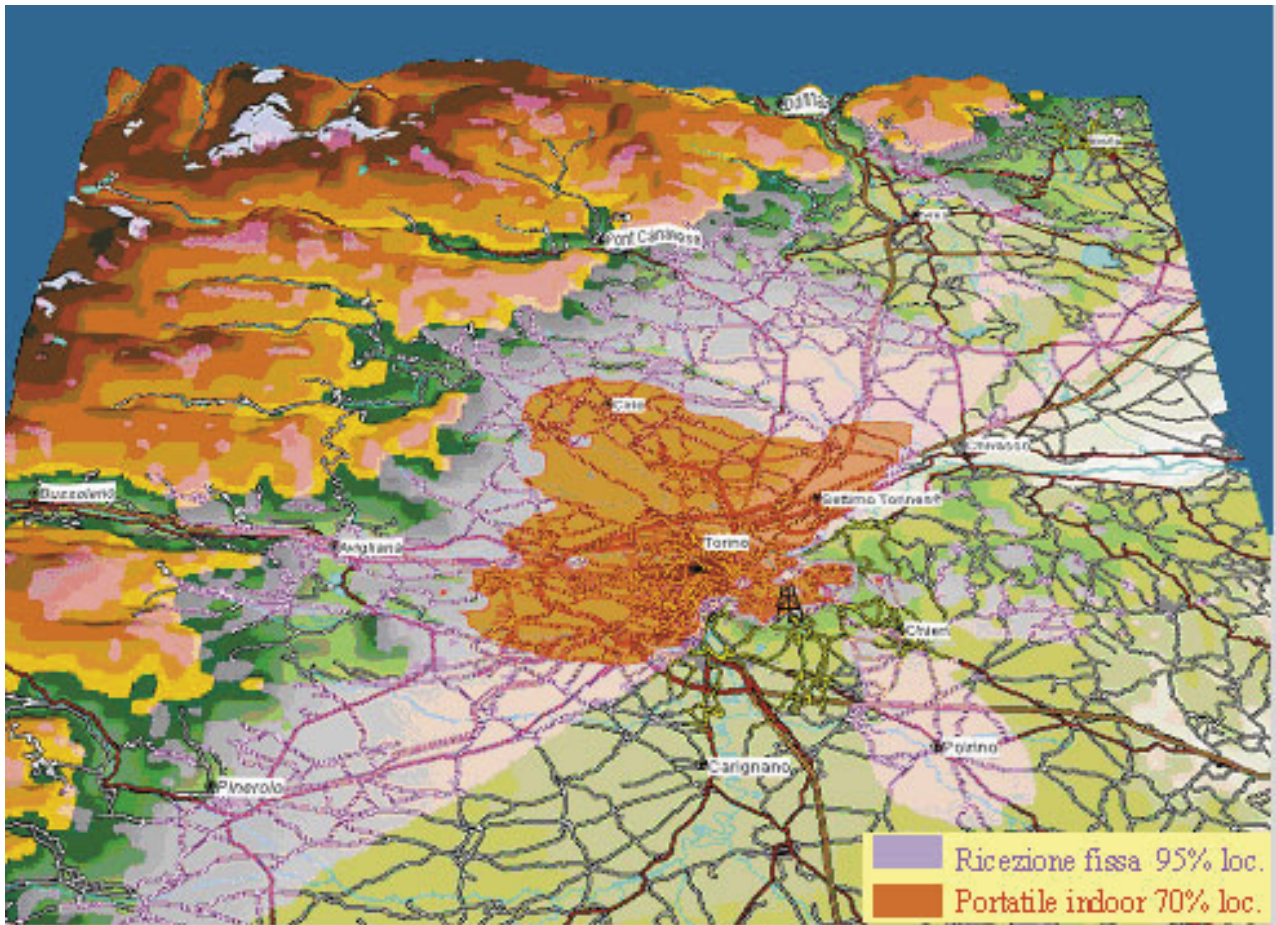



Fig. 1 - Copertura Im-pianto DVB-T di Torino Eremo sul canale 66.

terra, tetto) sui canali 66 e 64 oggetto delle sperimentazioni in corso in Piemonte e Valle d'Aosta. Tali campi sono stati calcolati applicando le formulazioni adottate in sede CEPT [7].

In figura 1 è riportata la stima della copertura dell'impianto di Torino Eremo sul canale 66, per i casi di ricezione fissa, e portatile indoor a piano terra. La figura 2 riporta la stima delle coperture fissa ed indoor al piano terra, relativamente alla rete SFN della Valle d'Aosta sul canale 64 (Impianti di Col de Courtil, St. Vincent, Blavy, Gerdaz, St. Nicolas) ottenute mediante un software appositamente sviluppato [8], basato sull'impiego di un GIS (Sistema informativo Geografico).

3. Sperimentazione pilota in Torino

3.1 Configurazione di servizio

Nel febbraio del 1998 Rai - CRIT, in collaborazione con la Divisione Trasmissione e Diffusione (ora RaiWay) ha dato inizio alle prime trasmissioni sperimentali di televisione digitale terrestre (DVB-T) in Italia. La piattaforma di generazione dei segnali è stata successivamente ampliata per la diffusione di un maggior numero di programmi e per includere applicazioni multimediali e di data broadcasting.

La catena di codifica e di multiplazione consiste attualmente di 5 codificatori MPEG-2

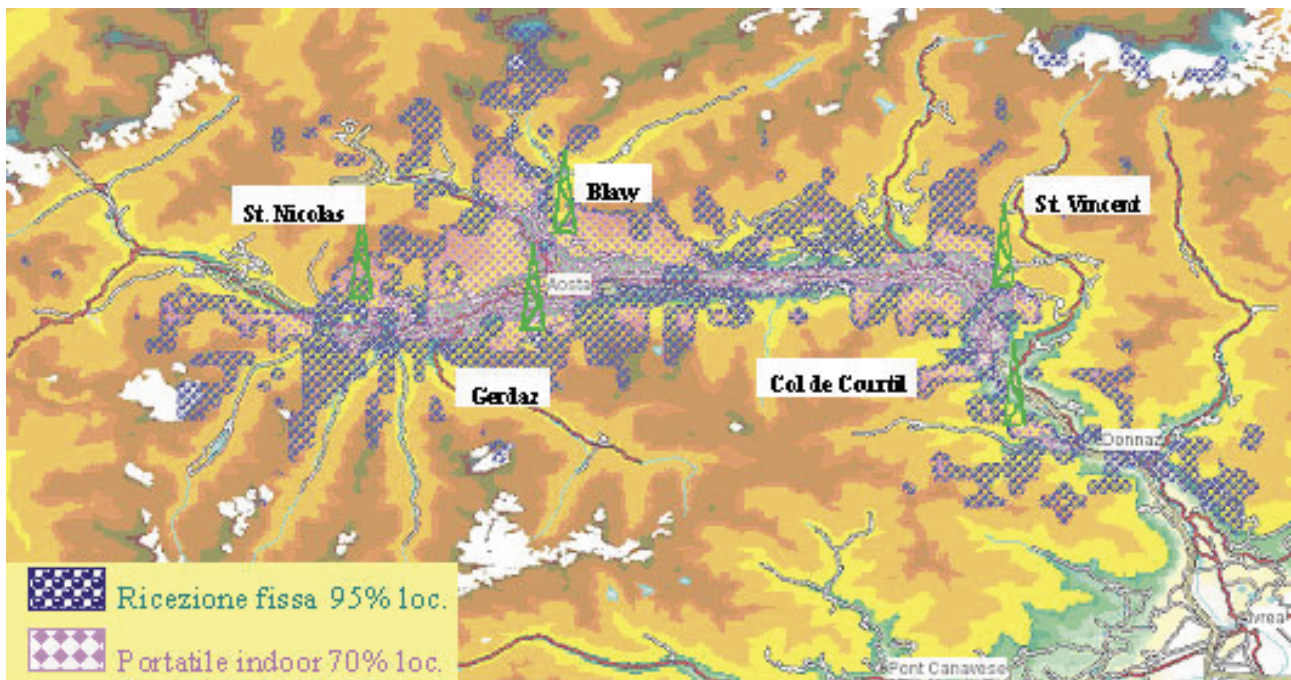



Fig. 2 - Copertura Rete DVB-T in Valle d'Aosta

statistici, un codificatore MPEG-2 a bit-rate costante, un re-multiplexer per fornire servizi EPG (Electronic Programme Guide) e MHP (Multimedia Home Platform), un generatore di informazioni SI (System Information) e PSI (Programme Specific Information).

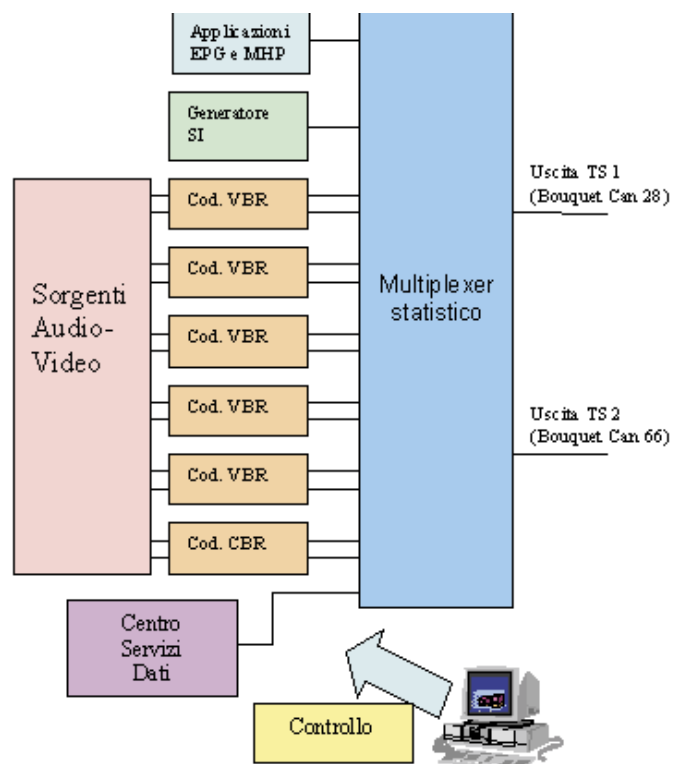
Il multiplatore riceve i flussi numerici dei singoli programmi (PES: Packetised Elementary Stream) dai codificatori e i servizi multimediali dal Centro Servizi Dati e genera due Transport Stream (TS) con bit-rate di 12,06 e 24,13 Mbps, trasportanti ciascuno un "bouquet" di programmi video, audio, dati. Un Personal Computer controlla i parametri della catena di codifica e multiplazione, come evidenziato in figura 3.

I due bouquet sono quindi trasferiti al Centro Trasmittente di Torino-Eremo, situato ad una distanza di circa 5 km dal CRIT e ad una elevazione di circa 500 m dall'area circostante, per mezzo di un ponte radio digitale. Il trasporto avviene in tecnologia

Fig. 3 - Catena di co-difica e multiplazione per il DVB-T

Tabella 2 - Caratteristiche dei segnali DVB-T in diffusione dal trasmettitore di Torino-Eremo				
Canale	Modulazione	Bit-rate (Mbps)	ERP (W)	Pol.
28	16QAM; 2k; 1/2; 1/32	12,06	300	V
66	64QAM; 8k; 2/3; 1/32	24,13	2000	H

Tab. 2 - Caratteristiche dei segnali DVB-T in diffusione dal trasmettitore di Torino-Eremo

Tabella 3 - Bouquet DVB-T sul canale 28		
Programma	Bit-rate (Mbps)	
	Video	Audio
RaiNews24	2 (CBR)	0,192
RaiSport	2÷5 (VBR)	0,192
RaiEducational	2÷5 (VBR)	0,192
Canali radio	-	0,384
Dati	1,5	

Tab. 3 - Bouquet DVB-T sul canale 28

Tab. 4 - Bouquet DVB-T sul canale 66

Tabella 4 - Bouquet DVB-T sul canale 66			
Programma	Bit-rate (Mbps)		
	Video		Audio
RaiUno	2÷6 (VBR)	Multiplex statistico: 20 Mbps	0,192
RaiDue	2÷6 (VBR)		0,192
RaiTre	2÷6 (VBR)		0,192
RaiSport	2÷8 (VBR)		0,192
RaiEducational	2÷8 (VBR)		0,192
RaiNews24	2 (CBR)		0,192
Dati	1,5		

ATM (Asyncronous Transfer Mode) tramite un tributario a 45 Mbps di un ponte radio SDH (Syncronous Digital Hierarchy), utilizzando una coppia di Adattatori di Rete (Network Adapter) ATM.

Al Centro Trasmittente i segnali dei due bouquet sono inviati a due modulatori COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) che alimentano due indipendenti catene trasmissive in banda UHF, una operante sul canale 28 (frequenza centrale: 530 MHz) e l'altra operante sul canale 66 (frequenza centrale: 834 MHz).

La tabella 2 riporta i parametri di modulazione e diffusione per le due catene. I rapporti C/N teorici su canale gaussiano, alla soglia di corretta ricezione, sono di 8,8 dB e 16,5 dB rispettivamente per le modulazioni 16QAM-1/2 e 64QAM-2/3.

Lo schema di modulazione adottato per il canale 66 è molto efficiente in termini di capacità e consente di trasmettere fino a 6 programmi televisivi (vedi tabelle 3 e 4). Questa configurazione, che permette una ampia e diversificata offerta di servizi, è particolarmente orientata alla grande utenza con ricezione fissa. Il bouquet contiene i programmi di RaiUno, RaiDue e RaiTre; ciò consente di effettuare una efficace valutazione comparativa della qualità e

robustezza dei segnali televisivi terrestri irradiati sui canali analogici e digitali.

I due trasmettitori sui canali 28 e 66 utilizzano differenti sistemi radianti, posizionati sullo stesso traliccio.

Dal momento che nell'area di servizio DVB-T i canali adiacenti ai canali 28 e 66 sono occupati da servizi televisivi analogici PAL, le catene trasmissive includono opportuni filtri RF che assicurano adeguati rapporti di protezione verso tali servizi. Gli stessi filtri garantiscono inoltre la protezione verso i canali "taboo", anch'essi occupati da servizi analogici nella stessa area.

E' allo studio la configurazione finale della piattaforma DVB-T sulla rete pilota nell'area torinese, che consisterà in una piccola rete SFN (Single Frequency Network) che include un secondo trasmettitore presso il CRIT, probabilmente sul canale 28, per estendere la copertura nell'area sud-est di Torino, schermata dalla collina dal trasmettitore principale. Le problematiche relative all'inserimento dell'adattatore SFN nella rete di collegamento in ponte radio tra CRIT e Centro Trasmittente sono state, per il momento, affrontate tramite sperimentazione in laboratorio.

3.2 Prestazioni del sistema DVB-T in area di servizio

Sono state condotte sperimentazioni in campo, focalizzate su valutazioni tecniche della qualità del servizio in ricezione fissa sul canale 66 e in ricezione mobile sul canale 28. I principali risultati sono riportati nel seguito.

3.2.1 Ricezione fissa (canale 66)

E' stato utilizzato un furgone equipaggiato con l'opportuna strumentazione e con un'antenna direttiva log-periodica

Fig. 4 - Automezzo attrezzato per le misure in ricezione fissa

(guadagno di 6 dB) montata su un palo estensibile fino ad una elevazione di 20 m dal suolo (figura 4). Un Personal Computer registra i parametri di misura ed i dati di posizione del mezzo ricavati da GPS (Global Positioning System).

I principali parametri di valutazione sono stati: la misura del campo elettromagnetico (E dB(mV/m)), la sua distribuzione cumulativa riferita alle previsioni di servizio distribuzione e il margine di ricezione, valutato come attenuazione (dB) da introdurre sul segnale RF per raggiungere la soglia di corretta ricezione QEF (Quasi Error Free).

Le misure di campo elettromagnetico sono state effettuate ad una elevazione di 10 m rispetto al terreno in conformità con la raccomandazione ITU 370, calcolando il valore del campo attraverso misure di potenza e considerando una stratificazione

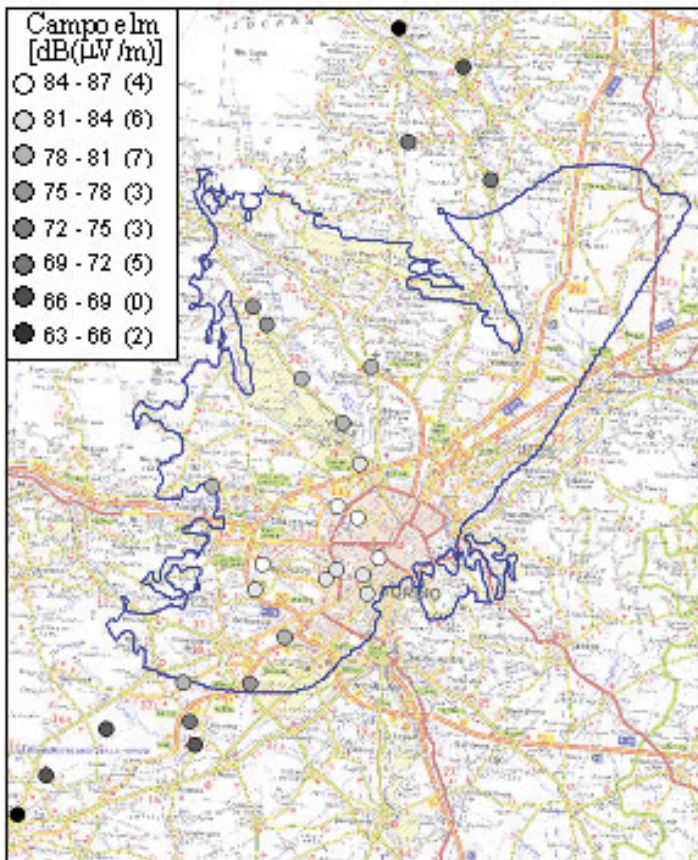
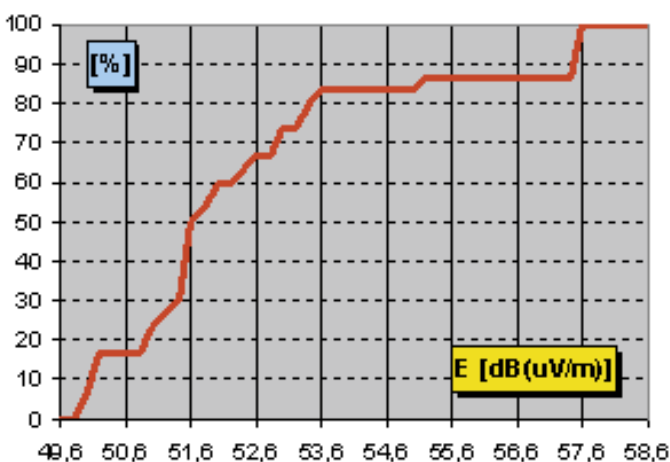



Fig. 5 - Misure di cam-po elettromagnetico nell'area di servizio del trasmettitore DVB-T sul canale 66

Fig. 6 - Distribuzione cumulativa dei valori di campo elettromagnetico alla soglia di ricezione

di ± 1 lunghezza d'onda intorno ai 10 metri di elevazione.

La figura 5 riporta i risultati delle misure di campo effettuate in varie località dell'area di servizio del trasmettitore DVB-T sul canale 66. Fra parentesi sono indicati i numeri di punti di misura nella fascia di campo e.m. relativo. L'area interna al contorno blu rappresenta l'area in cui, secondo i presupposti CEPT [7], la ricezione portatile indoor dovrebbe essere possibile per il 70% delle località.

In conclusione, in tutti i punti di misura la ricezione DVB-T è stata affidabile, con margini adeguati, ed i risultati di misura hanno confermato con buona approssimazione le previsioni di campo e di criteri di valutazione della CEPT. La figura 6 riporta la distribuzione cumulativa dei risultati delle misure.

Il valore di campo minimo alla soglia di ricezione è risultato compreso tra 50 e 57,5 dB(mV/m). La differenza tra i valori trovati ed il valore assunto dalla CEPT (48 dB(mV/m)) può essere dovuta sia alle caratteristiche del canale nei vari punti di misura, che si discosta dal modello teorico, sia alla eventuale presenza di interferenti co-canale.

3.2.2 Ricezione mobile (canale 28)

Il sistema DVB-T è stato progettato per la ricezione fissa, con antenna direttiva posta sul tetto dell'abitazione, e per la ricezione portatile, con antenna omnidirezionale a stilo posta direttamente sul ricevitore. Dal momento che il canale di trasmissione non può essere assunto completamente stazionario, soprattutto nel caso di ricezione portatile, a causa dei movimenti di persone e oggetti che riflettono il segnale attorno all'antenna ricevente, è stato necessario, nel progetto del sistema, tenere in considerazione lente variazioni della risposta

in frequenza del canale. Il sistema DVB-T utilizza, per la corretta demodulazione del segnale su un canale di trasmissione variante nel tempo, portanti pilota che non trasportano informazione, ma vengono utilizzate dal ricevitore per una stima dinamica del canale. Sebbene lo scopo di queste portanti pilota sia quello di permettere al ricevitore di inseguire variazioni lente della risposta del canale tipiche della ricezione portatile, la scelta di una configurazione di trasmissione particolarmente robusta (ad esempio 16QAM-2k, rate 1/2 o addirittura QPSK-2k, rate 1/2) consente in pratica di inseguire anche variazioni veloci, associate alla ricezione mobile, grazie alla elaborazione del segnale nel ricevitore.

Infatti, grazie alla flessibilità del sistema DVB-T che permette diverse configurazioni operative, è opportuno adottare, per la ricezione mobile, parametri trasmissivi che assicurino elevata robustezza al segnale a scapito però di una riduzione del bit-rate utile per il bouquet di programmi. I test di ricezione effettuati in movimento sul canale 28 sono quindi stati condotti utilizzando

Fig. 7 - Auto attrezza-ta per le misure in ricezione mobile

i parametri di modulazione specificati nella tabella 2.

E' stata quindi attrezzata un'auto con una antenna omnidirezionale, posta a circa 2 m di altezza (figura 7), equipaggiata con un banco di misura ed acquisizione dati gestito da personal computer.

Il sistema di misura ha permesso la rilevazione delle interruzioni del servizio, valutate sul segnale DVB-T visualizzato sullo schermo di un televisore installato a bordo, correlandoli con gli andamenti della potenza del segnale all'ingresso

Fig. 8 - Percorso N° 1, in area urbana

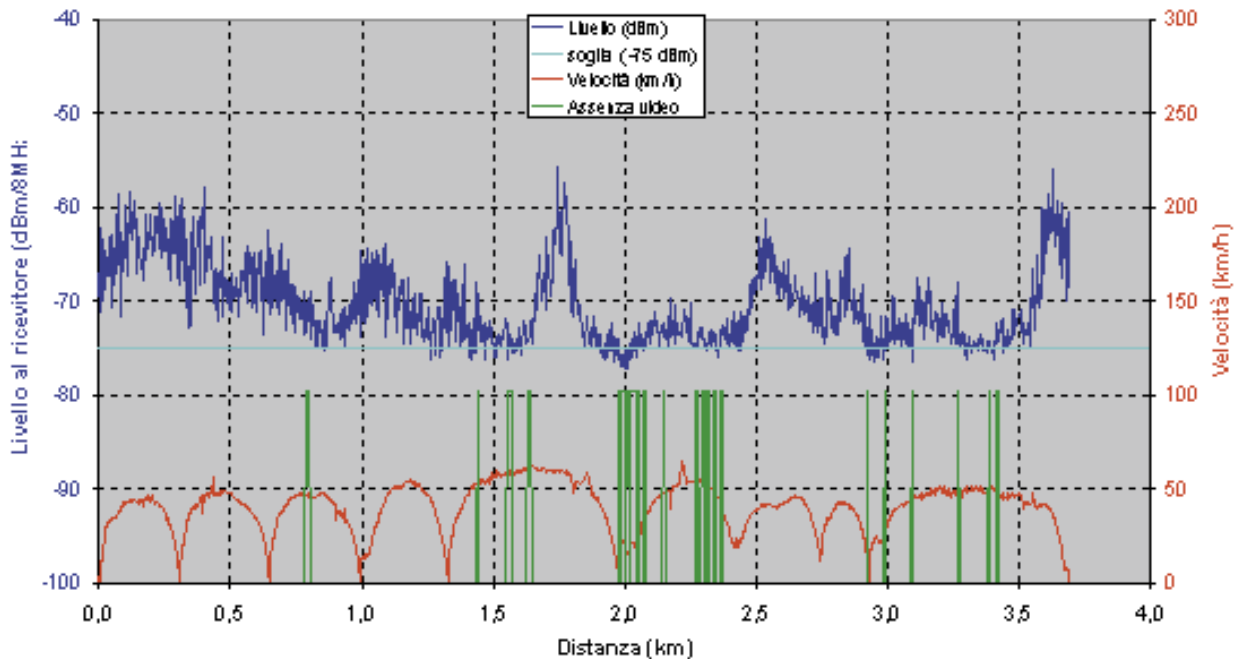



Fig. 9 - Misure relative al percorso N° 1.

del ricevitore e della velocità dell'auto in funzione della distanza lungo il percorso di prova. L'indagine ha finora interessato quattro itinerari, rappresentativi di diverse condizioni di ricezione in area urbana ed extraurbana, per una distanza complessiva di 110 km. I risultati dettagliati delle misure sono riportati in [9].

La figura 8 rappresenta il primo dei quattro percorsi, interamente situato in area urbana, mentre la figura 9 riporta il relativo grafico dei parametri misurati. La linea blu rappresenta il livello del segnale all'ingresso del ricevitore (in dBm su una banda di 8 MHz), la linea rossa riporta la velocità istantanea dell'auto (in km/h), mentre i segmenti verticali in verde indicano le interruzioni del servizio.

Tab. 5 - Percentuale di servizio per i vari percorsi

Tabella 5 - Percentuale di servizio per i vari percorsi	
Percorso	**% di copertura**
1 – Urbano	95
2 – Autostradale	80
3 – Extraurbano	93
4 – Urbano	84

I risultati complessivi di copertura del servizio sono riportati in tabella 5, dove vengono indicate le percentuali dei vari percorsi in cui si è rilevata la continuità del servizio. Si osserva che sui percorsi 2 e 3 extra-urbani ed autostradali la velocità del mezzo si è mantenuta mediamente intorno a 100 km/h.

Dall'analisi dei grafici relativi ai vari percorsi, riportati in [9], è stata individuata sperimentalmente una soglia di - 75 dBm per la potenza in ingresso al ricevitore,

corrispondente ad un valore di campo elettromagnetico di circa 55 dB(mV/m), in grado di garantire un buona qualità del servizio. Questo valore è di circa 7 dB maggiore rispetto alla soglia di corretta ricezione stabilita dalla CEPT per il canale Rayleigh [7], che è rappresentativo della ricezione con antenna omnidirezionale. Il peggioramento è da attribuirsi in parte all'effetto Doppler e in parte al contributo degli echi corti, particolarmente sui percorsi in area urbana. E' stato infatti dimostrato sia sperimentalmente che con simulazioni al calcolatore [10] che in presenza di echi corti rispetto alla durata del simbolo COFDM e di elevato livello (C/I » 0 dB, ritardo £ 200 ns), quali possono essere quelli generati da ostacoli vicini in assenza di raggio principale, il degradamento in termini di rapporto C/N risulta peggiore di circa 5-6 dB rispetto a quello originato da echi più lunghi, sempre però all'interno dell'intervallo di guardia.

Un secondo risultato ottenuto dalle misure in movimento riguarda le variazioni del campo elettromagnetico su aree locali (dell'ordine di 100-200 m) che possono essere così sintetizzate:

- variazioni massime di circa 10 dB e 15 dB sono state misurate in aree suburbane e urbane, rispettivamente, in condizioni di visibilità del trasmettitore;
- in presenza di ostacoli che schermano il trasmettitore (ad esempio edifici elevati in area urbana) le variazioni possono essere anche superiori a 20 dB, in corrispondenza al passaggio tra la condizione di schermatura e condizione di visibilità del trasmettitore. In questi casi si è riscontrata l'interruzione del servizio.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione in ricezione mobile, nella configurazione 16QAM che rende disponibile un bit-rate utile di circa 12 Mbit/s, sono incoraggianti e confermano la possibilità di introdurre servizi DVB-T all'utenza mobile, a condizione che vengano utilizzati schemi di modulazione robusti. Come contropartita, viene ridotta la capacità complessiva di trasmissione del canale rispetto allo schema di modulazione 64QAM, utilizzato per la ricezione fissa, che rende disponibile un bit-rate di circa 24 Mbit/s.

Sono allo studio presso Rai-CRIT [10] sistemi riceventi che impiegano sull'automezzo antenne dotate di agilità direzionale, in grado cioè di operare sulla base della diversità spaziale, riducendo significativamente il degradamento del segnale ricevuto, imputabile alle condizioni di ricezione variabili durante il percorso.

L'impiego di questi sistemi di ricezione a bordo potranno contribuire a migliorare la qualità del segnale ricevuto.

4. Rete pilota DVB-T in Valle d'Aosta

Rai–CRIT, in collaborazione con RaiWay, ha in corso di allestimento una rete DVB-T in Valle d'Aosta sul canale 64 (frequenza centrale = 818 MHz), che prevede 5 impianti trasmittenti in rete SFN nelle località di Gerdaz, St. Vincent, Col de Courtil, Blavy e St. Nicolas, come evidenziato in figura 10. La configurazione di rete è molto simile a quella già in esercizio sin dal 1995 per il servizio DAB (Digital Audio Broadcasting). Le potenze di apparato degli impianti trasmittenti sono le seguenti:

· St. Vincent: 500 W rms.
· Gerdaz: 500 W rms.
· Col de Courtil: 100 W rms.
· Blavy: 50 W rms.
· St. Nicolas: 50 W rms.

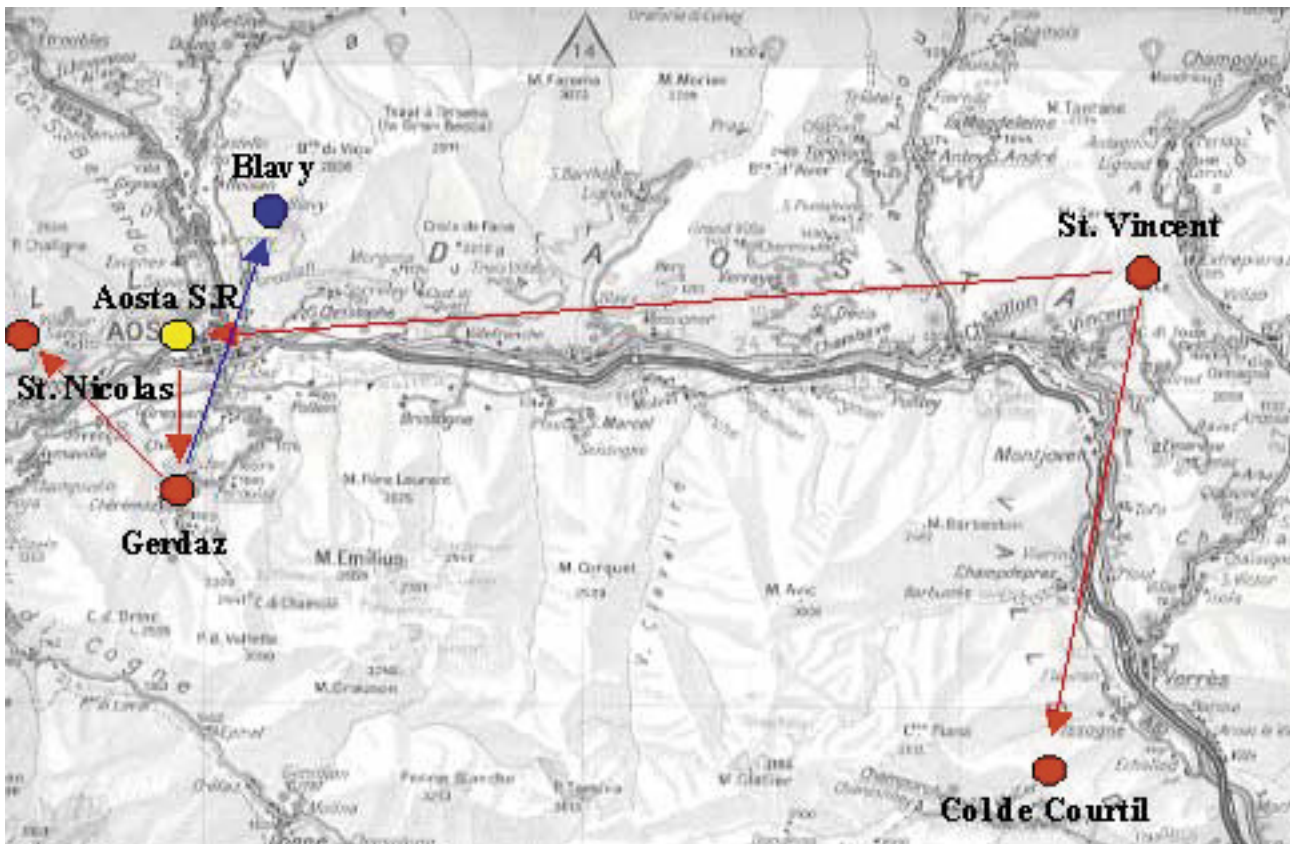



Fig. 10 - Configurazione della rete SFN DVB-T della Valle d'Aosta

4.1 Configurazione della rete SFN

La realizzazione della rete SFN viene aggiornata in fasi successive, sia per quanto riguarda l'attivazione dei trasmettitori che la modalità di trasporto del segnale ai trasmettitori.

Ad oggi, i centri trasmittenti di Gerdaz e St. Vincent sono già stati allestiti con trasmettitori DVB-T e sono operativi su carico artificiale, in attesa della concessione ministeriale all'irradiazione.

4.1.1 Trasporto tramite ponte radio analogico

Il multiplex DVB-T di banda base viene generato presso il Centro Trasmittente di St. Vincent utilizzando i programmi dei bouquet Rai diffusi da satellite e, dopo la modulazione OFDM, raggiunge l'impianto di Gerdaz per mezzo di un collegamento in ponte radio analogico normalmente utilizzato per il trasferimento dei segnali televisivi PAL. Per la compatibilità con gli ingressi dei ponti radio il segnale OFDM è trasferito dalla frequenza intermedia di uscita del modulatore (36,15 MHz) in una "banda base" compresa fra 0 e 10 MHz. Questa modalità di trasporto ha il duplice vantaggio di utilizzare un solo modulatore OFDM per tutta la rete SFN e di non richiedere grandi modifiche alla rete di distribuzione già esistente. Comporta però un degrado delle prestazioni del segnale DVB-T in termini di peggioramento del rapporto C/N, dovuto al fenomeno del rumore triangolare tipico della modulazione di frequenza, che si manifesta in modo più sensibile nella parte alta dello spettro OFDM Sul collegamento St. Vincent- Blavy è stato misurato un degradamento di circa di 0,1 dB [11]. A questo degrado, sebbene molto contenuto, potrebbe sommarsene uno ulteriore dovuto alle variazioni della propagazione (fading, effetti stagionali), che la attuale

configurazione di rete non equipaggiata con diversity di spazio/frequenza non consente di superare.

Altro aspetto di importanza non secondaria per una rete SFN connesso alla distribuzione del segnale mediante ponte radio analogico è quello della sincronizzazione temporale del segnale irradiato dai diversi trasmettitori che richiede un'opportuna compensazione dei ritardi di percorso. In una rete SFN l'area di servizio può essere in alcuni casi ottimizzata agendo sui ritardi relativi dei vari trasmettitori; tale operazione, nel caso di trasporto del segnale in formato analogico, può richiedere la conversione A/D del segnale di banda base e l'impiego di opportune linee di ritardo digitali.

4.1.2 Trasporto tramite ponte digitale e SFN adapter

Un sistema di distribuzione che non introduce degrado sul segnale OFDM, in termini di peggioramento dell'S/N, e nello stesso tempo risolve i problemi di sincronizzazione temporale dei trasmettitori, è quello basato sulla trasmissione del Transport Stream (TS) relativo al multiplex DVB-T su collegamenti digitali su ponte radio o su fibra ottica. Questa tecnica di trasporto richiede, a differenza della distribuzione analogica, che il segnale sia successivamente modulato OFDM presso ogni centro trasmittente. Per ottenere la sincronizzazione degli impianti trasmittenti, la specifica DVB/ETSI [12] utilizza dei blocchi di dati (MIP, Mega-frame Initialization Packet) inseriti nel TS mediante apparati "SFN adapter", recanti tutte le informazioni necessarie per ottenere la corretta sincronizzazione dei trasmettitori. La possibile conversione dell'attuale rete di distribuzione in ponte radio analogico impiegata nella sperimentazione DVB-T in Valle d'Aosta è allo studio da parte di Rai-CRIT e RaiWay, e utilizzerà le infrastrutture della attuale rete di distribuzione digitale SDH in ponte radio gestita da RaiWay.

Per quanto riguarda il multiplex DVB-T, si può ipotizzarne la generazione presso il Centro Trasmittente di St. Vincent, che opera come impianto capo-rete; in alternativa si valuta l'opportunità di generarlo presso il Centro Servizi di Rai-CRIT e Torino e trasportarlo sulla rete DVB-T della Valle d'Aosta attraverso un collegamento SDH. Ciò consentirebbe di estendere la sperimentazione DVB-T pre-operativa ad una vasta area geografica con un "bouquet di programmi" arricchito nei contenuti con nuovi servizi quali EPG, MHP etc., già disponibili presso Rai-CRIT.

5. Conclusioni

La televisione terrestre, dopo la televisione via satellite e via cavo, sta per passare anche nel nostro Paese dalla attuale soluzione analogica PAL a quella digitale, secondo lo standard DVB-T. Questa radicale conversione tecnologica potenzierà ulteriormente il servizio televisivo orientato al grande pubblico in termini quantitativi e qualitativi, rendendo disponibile una grande offerta di programmi televisivi, radiofonici e multimediali, offrendo inoltre nuove prospettive di mercato ai fornitori di servizio, ai gestori di rete, all'industria del settore.

Le principali caratteristiche delle reti di diffusione televisiva terrestre sono la copertura capillare del territorio e la possibilità di introdurre servizi a carattere regionale e locale. La disponibilità dei risultati di sperimentazioni in aree pilota inserite nella realtà della attuale diffusione televisiva analogica, per impianti singoli e in prospettiva per reti a singola frequenza

(SFN), risulta quindi essenziale per affrontare la futura progressiva digitalizzazione della rete diffusiva.

Nell'articolo sono riportati i principali risultati della sperimentazione di televisione digitale terrestre (DVB-T) condotta nell'area pilota di Torino; è stata inoltre presentata l'architettura della rete DVB-T in Valle d'Aosta che costituirà prossimamente una nuova area di sperimentazione.

La sperimentazione DVB-T di Torino, che costituisce un contributo all'attività condotta dall'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni e dal Ministero per le Comunicazioni, ha permesso di stimare la copertura della rete DVB-T, sulla base dei parametri tecnici adottati (ERP dei trasmettitori, frequenza del canale r.f, modulazione 64 QAM e/o 16 QAM, bit-rate., ecc.), di affrontare i problemi tecnici relativi al nuovo sistema (inter-operabilità tra apparati e certificazione delle loro caratteristiche, metodi di misura, previsioni campo,..) e di valutarne le prestazioni del servizio nei casi di ricezione fissa, con sistemi riceventi individuali, e mobile.

I risultati delle misure effettuate in area confermano sostanzialmente le prestazioni del sistema conosciute per via teorica e forniscono importanti elementi per la pianificazione sul territorio dei nuovi servizi DVB-T.

6. Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Dott. M. Cominetti per i suggerimenti alla stesura dell'articolo ed i colleghi A. Bertella, S. Berto, A. Gallo, D. Milanesio, S. Meneghello, R. Olivazzo, G.P. Placidi, B. Sacco, M. Tabone per i loro contributi alla sperimentazione.

Bibliografia

1. ETSI: Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, EN 300 744 V1.4.1, 01/2001.
2. M. Cominetti, A. Morello, R. Serafini: Prospettive per l'introduzione della televisione digitale terrestre in Italia, Elettronica e Telecomunicazioni, N° 3, dicembre 1999.
3. M. Cominetti, A. Morello, R. Serafini: Current plans for DTT implementation in a densely utilised frequency spectrum, Montreux TV Symposium, June 1999.
4. A. Bertella, M. Cominetti, S. Ripamonti, M. Visintin: The RAI DVB-T pilot trials in Turin, IBC 2000; Amsterdam; September 2000.
5. A.Bertella;B.Sacco;M.Tabone: Valutazione in laboratorio delle prestazioni del sistema DVB-T; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
6. CEPT/FM-PT24(01) Doc. 047 Rev.4, September 2001.
7. CEPT: The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the Introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T), Chester, July 1997.
8. P.B. Forni: A GIS Based Flexible Environment for the Coverage Prediction and Evaluation of SFN; XXV URSI General Assembly, Lille, Sept. 1996
9. S. Meneghello, R. Olivazzo, V. Sardella: Misure in ricezione mobile nell'area di servizio del trasmettitore DVB-T di Torino Eremo (can. 28–UHF), Relazione Tecnica Rai-CRIT N° 99/24, agosto 1999.
10. Bertella, B.P.Forni, G.Giancane, B.Sacco, M.Tabone: Ricezione indoor di segnali DVB-T; Elettronica e Telecomunicazioni, di prossima pubblicazione.
11. Bertella, S. Berto, S. Mina, M. Tabone: DVB-T: test sul collegamento in ponte radio analogico St. Vincent-Gerdaz, Relazione Tecnica Rai-CRIT N° 99/13, marzo 1999.
12. ETSI: Digital Video Broadcasting (DVB); DVB mega-frame for Single Frency Network (SFN) syncronisation, TS 101 191 V1.3.1, January 2001.

Valutazione in laboratorio del sistema DVB-T

ing. Andrea **Bertella**,
ing. Bruno **Sacco**,
p.i Mirto **Tabone**

Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

1. Introduzione

L' introduzione della televisione digitale terrestre (DVB-T) in vari Paesi europei rappresenta un importante passo verso la conversione globale del sistema radiotelevisivo alla tecnologia digitale. Il Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica della Rai (CRIT), in collaborazione con RayWay, già dalla seconda metà degli anni '90 ha intrapreso una vasta attività di studio e sperimentazione tecnica [1],[2],[3],[4], nel contesto nazionale ed internazionale, contribuendo direttamente alla definizione della normativa [5].

In questo contesto, nell'ambito del progetto europeo ACTS-VALIDATE, presso i laboratori Rai-CRIT di Torino è stata installata una catena completa di trasmissione-ricezione DVB-T sulla quale sono state effettuate specifiche valutazioni tecniche allo scopo di verificare le effettive prestazioni del sistema e confrontarle con i dati teorici. La catena comprende i codificatori MPEG-2 (per tre programmi TV), un multiplatore DVB-TS (Transport Stream), il modulatore COFDM operante secondo le principali configurazioni di trasmissione previste dalla specifica, un trasmettitore da 50W operante in UHF sul canale 28, o sul canale 43, ed un ricevitore semiprofessionale.

Le prestazioni del sistema sono state valutate in entrambi i modi 2k e 8k, previsti dalla normativa, in presenza di vari degradamenti tipici del canale di diffusione terrestre, quali: rumore gaussiano bianco (AWGN), rumore impulsivo, echi statici (singoli e multipli) soggetti anche

Sommario

La televisione digitale terrestre (DVB-T), già introdotta in Gran Bretagna e in altri paesi europei, è in fase di avanzata sperimentazione nel nostro Paese. Il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai (CRIT), nell'ambito del progetto DVB (Digital Video Broadcasting) e dei progetti europei RACE-dTTb e ACTS-VALIDATE, ha contribuito direttamente alla definizione e alla validazione del sistema DVB-T. Il sistema, che impiega la modulazione multiportante COFDM, con numerose possibilità di configurare i parametri di trasmissione e la codifica di canale, permette la ricezione fissa, portatile e mobile. Sono possibili due modi operativi a seconda del numero di portanti all'interno del canale a radiofrequenza: il primo, con 2k portanti FFT, è destinato all'impiego su reti di diffusione convenzionali multi frequenza (MFN), ed è particolarmente adatto ai servizi per terminali mobili; il secondo con 8k portanti è adatto anche all'impiego su reti a singola frequenza (SFN) permettendo lo sfruttamento ottimale delle risorse in frequenza.

L'articolo presenta i risultati delle prove di laboratorio effettuate da Rai-CRIT e da altri Partner europei in ambito al progetto ACTS-VALIDATE. Tali prove hanno permesso di valutare la robustezza del sistema DVB-T in presenza dei tipici degradamenti introdotti dal canale trasmissivo nelle bande VHF/UHF e dal ricevitore d'utente: rumore (gaussiano e impulsivo), echi, distorsioni non lineari, effetto Doppler, interferenza cocanale generata da altri segnali DVB-T e/o da segnali TV analogici, rumore di fase del sintonizzatore, ecc. Nell'articolo vengono riportati i risultati delle valutazioni di laboratorio confrontandoli con le prestazioni teoriche del sistema.

ad effetto Doppler, distorsioni non lineari (introdotte ad esempio da amplificatori delle reti di distribuzione condominiale in cavo), valutando nei vari casi il margine del sistema per una corretta ricezione. Infine si sono determinati i rapporti di protezione, per alcuni tipiche configurazioni operative, in presenza di interferenti co-canale dovuti sia ad altri segnali digitali DVB-T che a segnali analogici PAL, ciò al fine di pianificare l'introduzione dei nuovi servizi televisivi digitali nell'attuale contesto analogico.

Le valutazioni hanno permesso inoltre di analizzare alcuni aspetti inesplorati della modulazione COFDM, come ad esempio la sensibilità al rumore di fase del sintonizzatore/ricevitore – particolarmente critica nel modo 8k –, il degradamento dovuto ad echi lunghi e profondi – prossimi o addirittura superiori all'intervallo di guardia del sistema – e la possibilità di operare con ricevitori portatili o mobili, normalmente dotati di semplice antenna ricevente omnidirezionale.

I risultati riportati nel seguito [Nota 1], sono stati adottati da VALIDATE come prestazioni di riferimento dello standard DVB-T. Per informazioni generali sullo standard DVB-T si rimanda alla bibliografia [4], [5].

Nota 1 - Per un rapporto completo sui risultati delle misure di laboratorio si rimanda alla [1]

2. Procedimento di misura

La valutazione in laboratorio delle prestazioni del sistema è stata condotta introducendo sul segnale DVB-T i tipici degradamenti imputabili al canale trasmissivo (rumore casuale e impulsivo, interferenze, echi multipli, rumore di fase, off-set di frequenza, non linearità, ecc.) e misurando nei vari casi il tasso di errore (BER) sul segnale ricevuto, dopo il primo livello di correzione degli errori di trasmissione effettuato nel ricevitore mediante decodifica di Viterbi.

L'effetto dei vari degradamenti si traduce in un aumento del rapporto portante/rumore DC/N [dB], rispetto al canale ideale, necessario per ottenere una ricezione del segnale audio-video sostanzialmente priva di errori. Questa condizione di Quasi Error Free (QEF) si raggiunge ad un tasso di errore (BER) di 2×10^{-4} (dopo decodifica di Viterbi), a cui corrisponde sul segnale audio-video – a valle del secondo livello di correzione degli errori tramite decodifica di Reed Solomon – un tasso d'errore inferiore a 10-11. I valori di C/N per il canale ideale (affetto solo da rumore gaussiano bianco e in assenza di distorsioni) assunti dalla CEPT [6] per gli schemi di modulazione presi in esame durante le misure di laboratorio sono:

QPSK ½ => 3.1 dB;
16 QAM ¾=> 12.5 dB;
64QAM 2/3=> 16.5 dB.

L'entità del degradamento viene correntemente espressa dal Noise Margin Loss (NML) che corrisponde all'aumento del rapporto portante/rumore ΔC/N rispetto al canale ideale necessario per raggiungere la condizione di corretta ricezione.

La figura 1 mostra uno schema semplificato del banco di misura allestito in laboratorio per realizzare l'intera catena, dalla sorgente al ricevitore; la catena consente di operare sia a frequenza intermedia (IF; 35,5 MHz) che a radio frequenza (canali UHF 28 e 43).

Per ciascun tipo di degradamento è stato utilizzato il seguente procedimento di misura:

a) in assenza di degradamento aggiuntivo, si aumenta il livello del rumore AWGN fino al raggiungimento della condizione QEF e si annota il valore corrispondente

di C/N all'ingresso del ricevitore (misurato nella banda di 7,6 MHz occupata dal segnale DVB-T entro il canale UHF da 8 MHz);

b) si introduce quindi il degradamento e si riduce progressivamente il livello di rumore fino a ritrovare la condizione QEF. A ciò corrisponde un aumento DC/N (dB) che identifica il Noise Margin Loss (NML) del sistema per il tipo di degradamento in esame.

2.1. Perdite d'implementazione

Le prestazioni dell'intera catena DVB-T, anche in assenza di degradamenti aggiuntivi, sono inevitabilmente inferiori rispetto al caso ideale a causa delle prestazioni dei vari apparati; ciò si riflette in un aumento del rapporto C/N alla soglia di corretta ricezione.

Una prima valutazione ha quindi riguardato la misura del degradamento ΔC/N, dovuto ai vari elementi costituenti la catena DVB-T, rispetto alla catena ideale simulata al calcolatore [4]. I degradamenti misurati si riferiscono separatamente al processo di mo-demodulazione a frequenza intermedia (IF-IF), al degradamento imputabile al sintonizzatore del ricevitore (IF-RF), e a quello globale introdotto dall'intera catena di trasmissione a radiofrequenza (RF-RF). Gli apparati inclusi nei tre collegamenti IF-IF, IF-RF e RF-RF sono evidenziati in figura 1.

I risultati sono riportati nella tabella 1 per alcune tipiche configurazioni di servizio (QPSK-1/2; 16QAM-3/4; 64QAM-2/3) e per alcuni valori dell'intervallo di guardia Δ della modulazione multiportante COFDM. I parametri 1/2, 3/4 e 2/3 associati a QPSK, 16QAM e 64QAM si riferiscono al code-rate del codice correttore convoluzionale impiegato nello standard (il rapporto 2/3 individua 2 bit utili + 1 bit di protezione).

Dai risultati delle misure si possono trarre

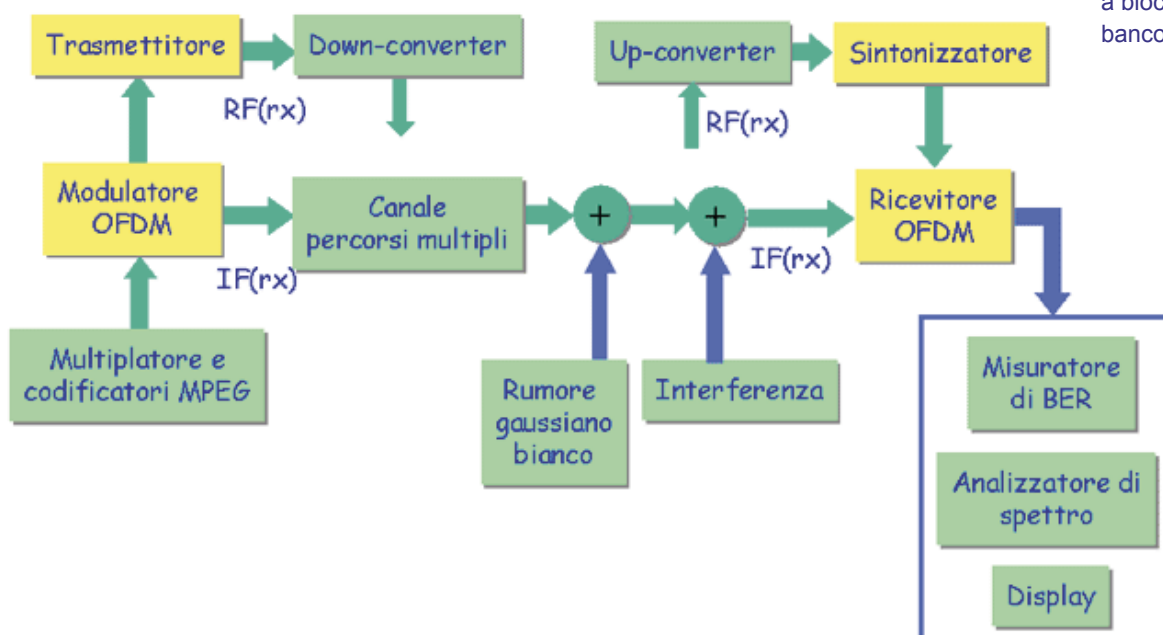



Fig. 1 - Schema a blocchi del banco di misura

Tabella 1. Perdite di implementazione ΔC/N [dB] rispetto al canale ideale

Configurazione delle connessioni in laboratorio			IF(tx)-IF(rx)	IF(tx)-RF(rx)		RF(tx)-RF(rx) Nota	
Modulazione e codifica	Δ	FFT	Degradamento modem base	Degradamento sintonizzatore		Degradamento totale	
				ch. 28	ch. 43	ch. 28	ch. 43
QPSK 1/2	1/8	2k	1.7	0.0		1.7	1.8
		8k	1.6	0.0		1.8	1.8
16QAM 3/4	1/32	2k	1.6	0.0		1.7	1.7
		8k	1.5	0.1		1.7	1.7
64QAM 2/3	1/4	2k	2.4	0.2	0.5	2.8	3.1
		8k	2.3	0.3	0.7	2.9	3.3

Nota: Il degradamento del rapporto C/N del sistema imputabile al trasmettitore dipende dalla configurazione di trasmissione adottata (codifica di canale e modulazione) e dalle distorsioni non lineari introdotte dall'amplificatore di potenza. Nella configurazione in esame si è misurato un degradamento compreso tra 0,1 e 0,3 dB.

Tab.1 - Perdite di implementazione ΔC/N [dB] rispetto al canale ideale

le seguenti conclusioni:

- Comportamento del ricevitore (BER dopo Viterbi):
  BER < 10^{-2} : sincronizzazione affidabile, ma qualità video inaccettabile
  BER= 10^{-3} : qualità video discreta
  BER=$2 \cdot 10^{-4}$: qualità video buona
- Perdita di implementazioe DC/N in connessione IF-IF:
  QPSK 1/2 e 16QAM 3/4: circa 1,6 dB, vicino al valore teorico per stima di canale 2D [4].
  64QAM 2/3: circa 2.4 dB, 0.8 dB peggiore del valore teorico
  per stima di canale 2D [4].
- Degradamento di 0.2 ¸ 0.7 dB dovuto al rumore di fase del tuner in funzione del canale RF (28 e 43).
- Le prestazioni nei modi 2k e 8k sono sostanzialmente comparabili.
- Le perdite d'implementazione complessive misurate sulla catena RF-RF sono risultate pari a circa 2 dB per QPSK 1/2 e 16QAM 3/4 (2.5 dB con Δ = 1/4) e di 3 dB per 64QAM 2/3.

2.2. Prestazioni in presenza di echi statici

Una importante caratteristica del sistema DVB-T, dovuta alle prestazioni intrinseche della modulazione COFDM, è la possibilità di operare su un canale R.F. soggetto ad echi statici profondi, sia naturali (prodotti da riflessioni del terreno o da vari ostacoli), sia artificiali, dovuti ai segnali dei vari trasmettitori di una rete isofrequenziale (SFN). Ciò consente potenzialmente di estendere il servizio anche alla ricezione del segnale con apparecchi portatili dotati di antenna omnidirezionale incorporata

("baffo") che, non essendo direttiva, non offre alcuna reiezione nei confronti degli echi. E' questo sicuramente un importante valore aggiunto dello standard digitale DVB-T nei confronti della televisione analogica.

Eco singolo

Le prove sono state effettuate sul canale 28 UHF, in connessione IF(tx)-RF(rx), in presenza di un singolo eco con valori di ritardo inferiori e superiori all'intervallo di guardia Δ adottato.

La figura 2 mostra l'andamento di NML relativamente alla configurazione 64QAM rate 2/3 nel modo 8k, in funzione del ritardo e dell'ampiezza dell'eco. Il parametro (C/I) indica in dB il rapporto fra la potenza del segnale principale (C) e quella dell'eco interferente (I). L'intervallo di guardia Δ=1/4, scelto nelle misure, a cui corrisponde una durata t_g = 224 μs, è tipicamente adottato nelle reti SFN.

Come si evince dalla figura 2 i risultati per il modo 2k sono simili, previo un opportuno scalamento nel ritardo dell'eco del fattore 2k/8k=0,25.

Dai risultati si possono trarre le seguenti conclusioni:

- I valori di NML misurati confermano sostanzialmente i risultati delle simulazioni al calcolatore [4].
- L'impiego di bassi code-rate (1/2 o 2/3) per il codice correttore convoluzionale aumenta la robustezza del sistema contro gli echi.
- Echi molto forti, aventi addirittura la stessa ampiezza del segnale principale (C/I=0 dB) ma con ritar-

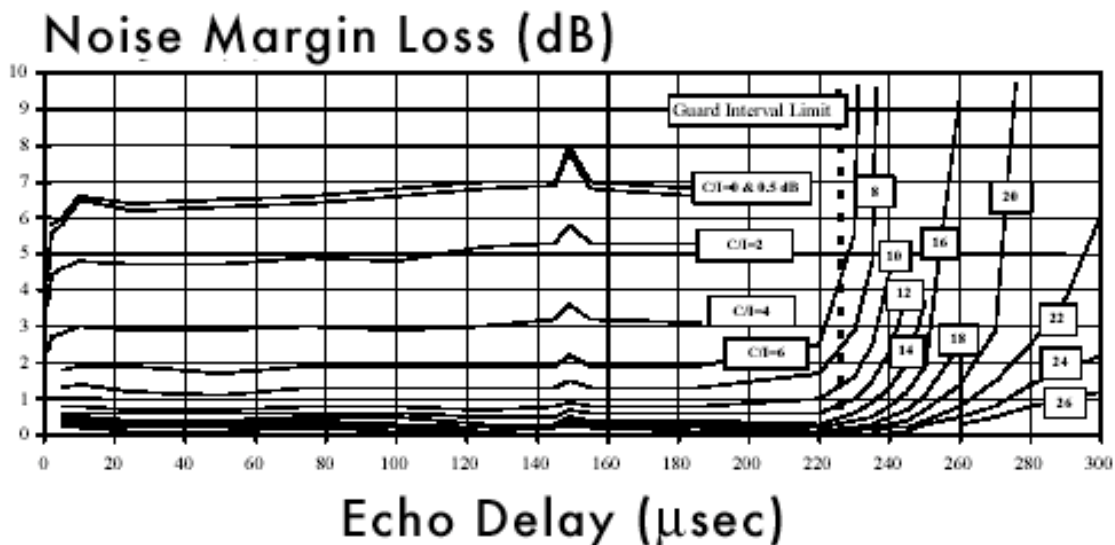



Fig. 2 - Degradamento (NML) dovuto alla presenza di un eco singolo

do contenuto entro l'intervallo di guardia, pur degradando le prestazioni del sistema non compromettono la ricezione in quanto il degradamento è parzialmente recuperato grazie al contributo in potenza sul segnale ricevuto dovuto agli echi medesimi. Si è misurato un NML compreso tra 4 e 9 dB, a seconda del code rate e del ritardo dell'eco.

Echi multipli

Nota 2 - E' una tipica rete SFN che include molti piccoli trasmettitori su un'area limitata

Sono stati considerati quattro profili di echi statici, indicati rispettivamente come "fixed", "portable", "dense SFN" Nota 2 e "regional SFN"; essi caratterizzano tipiche condizioni di ricezione riscontrabili in area di servizio a seconda anche della tipologia di rete.

I primi due casi "fixed" e "portable", definiti in dettaglio nell'Annex B della specifica DVB-T [5], rappresentano rispettivamente le condizioni di ricezione fissa con antenna direttiva (distribuzione di Rice) e di ricezione portatile con antenna omnidirezionale (distribuzione di Rayleigh). Per ciò che riguarda gli altri due casi, si è adottata la seguente configurazione degli echi (τ=ritardo in μs, γ=C/I in dB):

Dense SFN:
raggio 1: τ=0, γ=0;
raggio 2: τ=7.8, γ=9.3;
raggio 3: τ=11.6, γ=5.5;
raggio 4: τ=17.5, γ=16.1;
raggio 5: τ=20, γ=14.5 ;
raggio 6: τ=23.4, γ=23.4;

Regional SFN:
raggio 1: τ=0, γ=0;
raggio 2: τ=Δ/3, γ=9.3;
raggio 3: τ=Δ/2, γ=5.5;
raggio 4: τ=7Δ/10, γ=16.1;
raggio 5: τ= 4Δ/5, γ=14.5 ;
raggio 6: τ= 9D/10, γ=23.4._

La tabella 2 riporta i risultati delle misure che non si scostano sensibilmente da quelli ottenuti mediante le simulazioni al

Tab. 2 - Degradamento da echi multipli che cadono all'interno dell'intervallo di guardia

Tabella 2 - Degradamento da echi multipli che cadono all'interno dell'intervallo di guardia

	Noise margin losses ΔC/N [dB] (Rifermento: AWGN prestazioni di canale)					
Condizioni di ricezione	**QPSK 1/2** Δ=1/8		**16QAM 3/4** Δ=1/32		**64QAM 2/3** Δ=1/8	
	2k	8k	2k	8k	2k	8k
Fisso (Rice, antenna direttiva)	0.4 (0.5*)	0.4 (0.5*)	0.8 (0.5*)	0.6 (0.5*)	0.7 (0.6*)	0.5 (0.6*)
Portatile (Rayleigh, antenna omnidirezionale)	2.5 (2.3*)	2.6 (2.3*)	4.3 (4.2*)	4.4 (4.2*)	3.4 (2.8*)	3.5 (2.8*)
SFN densa (Rayleigh)	2.1	2.2	(**)	3.5	2.6	2.8
SFN regionale (Rayleigh)	2.1	2.2	3.4	3.4	2.5	2.8

(*) : simulazioni al calcolatore
(**): non valutabile (presenza nel profilo di canale di un eco oltre l'intervallo di guardia)

calcolatore, indicati fra parentesi.

Il degradamento ΔC/N riscontrato su canale Rice – che è tipico della ricezione fissa con antenna direttiva (raggio principale di 10 dB superiore agli echi) – raggiunge gli 0,8 dB. Su canale Rayleigh, affetto da propagazione multipercorso con nessun raggio dominante – condizione tipica della ricezione con terminale portatile equipaggiato con antenna omnidirezionale – il degradamento è significativamente inferiore a quello dovuto ad un eco singolo a 0 dB, come si vede dalla figura 2.

2.3. Prestazioni in presenza di echi affetti da Doppler-shift

Benché il sistema DVB-T sia stato sviluppato inizialmente per la ricezione fissa, si possono presentare casi in cui, a causa del movimento di oggetti riflettenti attorno all'antenna ricevente (specialmente per ricevitori portatili con antenna omnidirezionale), la risposta in frequenza del canale subisca lente variazioni che possono degradare le prestazioni del sistema, in particolare nel modo 8k dove si ha la minor durata del simbolo COFDM rispetto al modo 2k.

Nel modo 2k – tipicamente impiegato nelle reti MFN – impiegando modulazioni e code rate robusti (ad esempio QPSK-1/2, 16QAM-1/2) è possibile anche la ricezione mobile[Nota 3] [3], anche se la specifica del sistema non include il time interleaving – impiegato nel DAB [7] – che consente di assorbire le fluttuazioni a breve termine del segnale.

Si sono pertanto valutate le prestazioni del sistema in presenza di echi singoli e multipli affetti da Doppler shift, che simula la condizione di fluttuazione del segnale suddetto. Nel caso più semplice di due soli raggi la risposta del canale è caratterizzata da "buchi" in frequenza che si spostano nel tempo a velocità costante generando variazioni di ampiezza e fase della costellazione di ciascuna portante COFDM. In presenza di più raggi la risposta in frequenza e la sua evoluzione si complicano ulteriormente.

Le misure sono state effettuate sul canale 28 – UHF in due tipiche configurazioni caratterizzate da differenti profili di echi con ritardi inferiori all'intervallo di guardia:

Eco singolo:

- Ritardo 0.9Tg;
- Doppler: τ=0 (raggio principale), $2f_d$;
- Attenuazione dell'eco: 0, 3, 5 e 10 dB;

Echi multipli:

- Ritardi: t=0 (raggio principale), $T_g/4$, $T_g/3$, $2T_g/3$;
- Doppler: $+f_d$, $-f_d$, $+f_d$, $-f_d$;
- Attenuazione di ogni singolo eco rispetto al raggio principale di 0, 8.77 dB (C_m/SI_e = 4 dB) e 14.77 dB (C_m/SI_e =10 dB).

Con riferimento alla tabella 3, per le tre configurazioni considerate si è determinato il massimo valore del Doppler shift f_d (picco-picco) in Hz tale da introdurre un degradamento NML di 4 dB rispetto al canale con il medesimo profilo di echi ma statici. Poiché, il NML in funzione di f_d degrada molto rapidamente, la scelta del NML= 4 dB come riferimento non è critica ai fini dei risultati ottenuti.

La tabella 3 riporta i principali risultati. Le prestazioni con eco singolo e con echi multipli sono comparabili; come previsto, la configurazione 2k, grazie alla minore durata del simbolo, consente una velocità di equalizzazione delle variazioni del canale circa quattro volte più elevata di quella dell'8k; pertanto il modo 2k offre

Nota 3 - Nel modo 2k la durata del simbolo COFDM è ¼ rispetto al modo 8k; pertanto le variazioni della risposta del canale all'interno della durata del simbolo – ed il relativo degradamento – sono inferiori rispetto al modo 8k e tipicamente dell'ordine di ¼.

Tabella 3. Massimo Doppler shift (fd) per un NML=4 dB

Modulazione e code rate	Modo	Eco singolo C_m/I_e =0	Eco singolo C_m/I_e =3	Eco singolo C_m/I_e =10	Echi multipli $C_m/\Sigma I_e$=0	Echi multipli $C_m/\Sigma I_e$= 4	Echi multipli $C_m/\Sigma I_e$=10
		Doppler shift f_d [Hz]					
QPSK-1/2	2k	150	160	>210	115	280 (*)	>425
(Δ=1/8)	8k	24	50	>210	27	70 (*)	>425
16QAM-3/4	2k	23	58	165	37	80	155
(Δ=1/32)	8k	5	15	40	10	19	45
64QAM-2/3	2k, Δ=1/4	14	19	95	15	28	100
	8k, Δ=1/8	4	8	23	4	8.5	21

(*): sul canale 28 UHF corrisponde a una velocità pari
280 Hz => 137 km/h 70 Hz => 34 km/h

Tab. 3 - Massimo Doppler Shift (fd) per un NML = 4 dB

prestazioni notevolmente superiori al modo 8k in ricezione mobile.

Il massimo Doppler shift f_d accettabile dipende fortemente dal livello degli echi. In presenza di echi molto forti (C/I= 0 dB) il modo QPSK-1/2 (2k) può reggere Doppler shift di oltre 100Hz, rendendo quindi possibile la ricezione mobile con un bit rate utile limitato però a circa 6 Mbps. Il modo 64QAM-2/3 (8k) può invece inseguire solo variazioni lente del canale (pochi Hertz) risultando pertanto essenzialmente adatto alla ricezione fissa, con un bit rate utile di circa 24 Mbps.

Prove successive hanno dimostrato la possibilità di impiegare in ricezione mobile anche il 16QAM- ½, che rende disponibile un bit rate utile di circa 12 Mbps.

2.4. Degradamento dovuto al rumore impulsivo

La presenza di rumore impulsivo si può riscontrare in prossimità di linee ad alta tensione, ferrovie, impianti industriali, ecc. e può altresì verificarsi in ambito domestico a causa degli elettrodomestici (frigoriferi, forni a microonde, rasoi elettrici ecc.). E' importante valutare il possibile degradamento introdotto sulla qualità di ricezione del segnale digitale.

Il rumore impulsivo è stato simulato per mezzo di un generatore di impulsi filtrato con un filtro SAW centrato alla frequenza intermedia (IF) del canale; la frequenza di ripetizione dell'impulso (PRF) è stata variata fra 50 Hz e 20 kHz.

Le misure sono state effettuate rilevando il rapporto segnale-interferente C/I_o a cui corrisponde un degradamento (NML o ΔC/N) di 1 dB, 3 dB e ∞ dB, per un

BER=$2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi. I_o è la potenza media del rumore impulsivo filtrato e normalizzato rispetto al PRF in modo tale che, mantenendo I_o costante, l'ampiezza dell'impulso risulta indipendente da PRF.

La figura 3 mostra i risultati più significativi relativi alla configurazione 64 QAM rate 2/3, modo 8K.

L'andamento delle curve può essere così interpretato:

Per valori di PRF che introducono una ripetizione temporale del disturbo impulsivo sul simbolo COFDM inferiori a circa 890 Hz solo un simbolo ogni N risulta danneggiato dall'interferente, dove N= symbolrate/PRF. Di conseguenza il BER medio è proporzionale al PRF. L'andamento del C/I_0 in funzione del BER risulta all'incirca piatto (circa 1 dB / decade di BER), e quindi la pendenza che ne deriva è trascurabile. Pertanto la condizione di ricezione è critica essendo possibile passare rapidamente da una ricezione corretta all'interruzione del servizio allorchè il livello del disturbo impulsivo aumenta anche solo di qualche dB (C/I_0 intorno ai 40 dB).

Per PRF superiori alla durata del simbolo COFDM, ossia per frequenze superiori a 890 Hz, ci sono M impulsi interferenti per ogni simbolo, e la potenza dell'interferente cresce in modo proporzionale al PRF. Di conseguenza la pendenza delle curve nella parte destra del grafico è di circa 10 dB per decade. Ciò significa che, per una corretta ricezione, il livello del disturbo impulsivo accettabile si riduce progressivamente al crescere della frequenza di ripetizione.

2.5. Disallineamento nella risposta in frequenza del canale

Sono state effettuate prove di laboratorio per valutare il degradamento (NML) dovuto ad alterazioni della risposta in frequenza, entro la banda di 7,6 MHz occupata dal segnale COFDM, con una pendenza

Fig. 3 - 64QAM-2/3: prestazioni con rumore impulsivo (modo 8k)

Tabella 4 - Bouquet DVB-T sul canale 66			
Programma	Bit-rate (Mbps)		
	Video		Audio
RaiUno	2÷6 (VBR)	Multiplex statistico: 20 Mbps	0,192
RaiDue	2÷6 (VBR)		0,192
RaiTre	2÷6 (VBR)		0,192
RaiSport	2÷8 (VBR)		0,192
RaiEducational	2÷8 (VBR)		0,192
RaiNews24	2 (CBR)		0,192
Dati	1,5		

Tab. 4 - Tilt T [dB] per un dato noise margin loss ΔC/N [dB]

costante (tilt); questo tipo di disallineamento può essere introdotto dai convertitori e/o dagli amplificatori di canale degli impianti centralizzati d'antenna e/o dagli eventuali ripetitori DVB-T in banda (gap-filler) impiegati all'interno degli edifici. La valutazione delle prestazioni del sistema DVB-T con ricezione indoor, in particolare per quanto riguarda l'impiego di gap-filler, sarà oggetto di un prossimo articolo da pubblicare su questa rivista._

Allo scopo è stato simulato in laboratorio un tilt dello spettro di T [dB] (picco-picco), ottenuto introducendo un eco a 0 dB con ritardo di 50 ns (equivalente ad una periodicità dei buchi nello spettro di 1/50 ns = 20 MHz) e con fase tale da generare il tilt desiderato, con pendenza positiva o negativa (slope + o slope -). Si sono quindi ottenuti gli spettri indicati in figura 4.

La tabella 4 riporta i valori massimi del tilt T in dB che generano un degradamento NML (ossia Δ C/N) inferiore di 0.5 e 1 dB rispetto al canale ideale affetto solo da rumore bianco gaussiano. Le valutazioni sono state effettuate sul 64QAM (rate 2/3, Δ=1/4), nei due modi 2k e 8k.

I risultati delle misure mostrano che il valore di tilt sulla risposta in banda accettabile dipende fortemente dal tipo di pendenza (positiva o negativa). Nel caso peggiore (pendenza positiva), il massimo tilt tollerabile è risultato di 2,5-3 dB per un degradamento di 0.5 dB e di 4.5 ÷ 5 dB per un degradamento di 1 dB. Questi valori evidenziano l'importanza di assicurare una corretta risposta in frequenza dei componenti costituenti le reti di distribuzione condominiali (amplificatori, convertitori di canale, ecc.), oltre ad un buon adattamento di impedenza della rete di distribuzione in cavo attraverso una accurata messa a punto dell'impianto.

Per valutare l'ulteriore possibile degradamento imputabile al sistema di ricezione d'antenna dell'impianto condominiale, è stato applicato un disallineamento di questo tipo ad un segnale che simula la ricezione via etere affetta da echi tipici del canale Rice. Tale situazione si può verificare distribuendo attraverso l'impianto condominiale non perfettamente allineato il segnale ricevuto con antenna direttiva. I risultati delle misure si possono così sintetizzare: nel caso di disallineamento con pendenza positiva (caso peggiore) sono

Fig. 4 - Spettri affetti da Tilt con pendenza negativa e positiva

stati misurati valori simili di degradamento con gli stessi livelli di tilt delle prove precedenti. Al contrario, con pendenze negative (caso migliore), i valori di tilt più alti tollerabili su canale gaussiano (8-12 dB) non erano più applicabili e sono stati misurati valori simili a quanto trovato con tilt a pendenza positiva.

In conclusione, si può dire che il degradamento imputabile ad alterazioni lineari con andamento monotono della risposta in frequenza del canale RF può essere contenuto entro 0.5÷1 dB a condizione che il tilt dello spettro in banda sia inferiore a 3÷5 dB.

La maggior sensibilità alle distorsioni generate da disallineamenti nella risposta in frequenza con tilt a pendenza positiva riscontrata nelle prove è stata oggetto di ulteriori valutazioni di laboratorio che hanno consentito di imputare il comportamento asimmetrico alle prestazioni del ricevitore prototipale impiegato nella catena dTTb. Il ricevitore commerciale impiegato nelle successive prove di verifica ha presentato un comportamento simmetrico nei confronti della pendenza del tilt (slope + o slope -) la cui entità, per un degradamento DC/N= 0.5 dB e 1 dB, è risultata compresa tra 5 e 6.5 dB rispettivamente.

2.6. Prestazioni con interferenza co-canale

L'introduzione dei nuovi servizi televisivi digitali DVB-T richiede la conoscenza del massimo livello d'interferenza accettabile e provocato da altri segnali, sia analogici che digitali, irradiati sulla stessa frequenza (interferenza co-canale) o su canali adiacenti. Queste condizioni del servizio operativo sono individuate dai rapporti di protezione CCI e ACI. La conoscenza di questi valori, già adottati dall' ITU con l'introduzione della televisione terrestre analogica, è fondamentale per la pianificazione dei nuovi servizi televisivi digitali. I valori misurati in laboratorio e riportati nel seguito riguardano esclusivamente l'interferenza co-canale, mentre per informazioni più complete si rimanda al rapporto della CEPT [6].

Interferente digitale DVB-T su DVB-T

Il rapporto di protezione (PR) co-canale (CCI) è definito come:

"rapporto in potenza tra segnale utile e segnale interferente che porta alla soglia di ricezione QEF in assenza di rumore aggiuntivo (BER pari a $2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi)".

Si osservi che un sistema caratterizzato da un basso rapporto di protezione è in grado di accettare, senza degradamento di qualità, livelli d'interferenza elevati. La tabella 5 riporta i valori di CCI ottenuti sul

Tab. 5 - Valori di PR(CCI) [dB] per interferenza DVB-T su DVB-T

Tabella 5. Valori di PR(CCI)[dB] per interferenza DVB-T su DVB-T

Modulazione	Code rate	PR (CCI)
QPSK	1/2	4.8
16-QAM	3/4	14.3
64-QAM	2/3	19.3

Tabella 6. **Valori di PR(CCI) per DVB-T interferito da segnale TV analogico**

Segnale voluto	Segnale interferente	PR(CCI) [dB]											
		QPSK, r=1/2				16-QAM, r=3/4				64-QAM, r=2/3			
		8k		2k		8k		2k		8k		2k	
		L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
BBC(*)	PAL-I	ND	ND	-11	-9	ND	ND	-4	-0.5	ND	ND	-1.5	+1
DTTb	PAL-G	-2	+4	-3	+4	-2	+4	-2	+5	+2	+6	+3	+6
DTTb	Secam	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-5	+5	+5	+8

(*) Misure effettuate con soglia "Failure point" (probabilmente tali misure danno dei rapporti di protezione lievemente più bassi rispetto a quanto ottenibile con la misura a BER=2.10^{-4}).

Tab. 6 - Valori di PR(CCI) per DVB-T interferito da segnale TV analogico

canale 28 UHF per tre differenti configurazioni di trasmissione, in modalità 2k e con intervallo di guardia Δ=1/4.

Il segnale interferente è stato ottenuto dal segnale utile ritardandolo di 360 ms –superiore cioè alla durata totale del simbolo COFDM di 280 ms al fine di riprodurre la condizione di ricezione più critica – ed introducendo progressivamente uno spostamento di frequenza Δf rispetto al centro del canale RF. Sono stati introdotti 17 valori di Δf all'interno del canale (fra -8 kKz e +8 kHz, a passi di 1 kHz), rilevando il valore peggiore del rapporto di protezione CCI che è stato riportato in tabella 5.

I risultati dimostrano, come prevedibile, che un interferente DVB-T ha effetti simili al rumore gaussiano avente medesimo livello di potenza nella banda del ricevitore.

Interferente da TV analogica su DVB-T

In ambito al Progetto RACE dTTb, BBC, CCETT e RAI hanno effettuato numerose prove di laboratorio per valutare i rapporti di protezione del segnale DVB-T interferito da segnale TV analogico negli standard impiegati in Gran Bretagna (PAL-I), Francia (L/SECAM) ed Italia (PAL-G, nelle bande IV e V).

Le misure sono state effettuate nelle seguenti condizioni:

- Segnale PAL-I, con audio FM non modulato e sottoportante audio digitale NICAM. Segnale DVB-T: intervallo di guardia 1/32
- Segnale PAL-G, con audio FM modulato con tono ad 1 kHz e NICAM. Segnale DVB-T: intervallo di guardia 1/4
- Segnale L/SECAM, con audio AM non modulato e senza NICAM. Segnale DVB-T: intervallo di guardia 1/4

La tabella 6 riporta i risultati relativi ai rapporti di protezione co-canale CCI di segnali DVB-T interferiti da segnali TV analogici, modulati da un'immagine fissa (barre di colore EBU-75%). Nel caso dei segnali analogici a norma PAL il rapporto di protezione CCI è definito come:

"rapporto fra la potenza media del segnale DVB-T e la potenza del segnale PAL interferente, misurata al picco del sincronismo, che porta alla soglia di ricezione QEF in assenza di rumore aggiuntivo".

Il picco del sincronismo individua infatti il livello della portante r.f. non modulata a cui corrisponde la massima potenza del segnale irradiato.

I valori di CCI in Tabella 6 sono stati rilevati aumentando progressivamente il livello del segnale analogico interferente fino a raggiungere un BER pari a 2.10-4 dopo decodifica di Viterbi, tranne quando diversamente indicato. Si riscontra che i valori di CCI misurati presentano una periodicità corrispondente alla spaziatura delle portanti COFDM (4.4 kHz nel modo 2k e 1.1 kHz nel modo 8k). L'ampiezza di queste variazioni è indicata nella Tabella 6 dalle colonne "L" e "U", dove la colonna "L" riporta i valori migliori, mentre la colonna "U" quelli peggiori. In alcuni casi si è riscontrata una più marcata casualità dei risultati.

I valori di CCI misurati nei modi 2k e 8k non sono molti differenti, tranne per quanto riguarda il SECAM, dove la portante audio AM non era modulata e il segnale NICAM non era presente.

Si è osservato un degradamento molto significativo delle prestazioni quando la portante video analogica è vicino alle portanti pilota continue del segnale DVB-T [5]. Nel 64QAM, quando si verifica tale condizione, si riscontra un degradamento notevole. Tali valori non sono stati riportati in tabella 6. E' quindi molto importante evitare questa situazione giocando opportunamente, nella fase di messa a punto della catena trasmittente, sulla posizione dello spettro del segnale COFDM nel processo di conversione FI – RF rispetto alla portante video analogica del segnale co-canale RF interferente.

Benché la posizione dello spettro in frequenza del segnale DVB-T irradiato possa essere attentamente scelta in modo da limitare sensibilmente l'interferenza della portante video analogica con le portanti pilota "continue" del DVB-T, questo potrebbe costituire un vincolo stringente per la pianificazione dei nuovi servizi nel nostro Paese, in particolare nella situazione ibrida analogica PAL-digitale DVB-T che caratterizzerà la prima fase.

I valori di CCI ottenuti sul dimostratore dTTb hanno dimostrato una dipendenza dalla configurazione DVB-T adottata superiore a quanto ci si attendeva, probabilmente dovuta alle prestazioni del ricevitore prototipale. Questo vale in particolare per i valori di CCI relativi al 16QAM e al QPSK, che sono risultati superiori a quelli adottati dalla CEPT nella pianificazione dei servizi DVB-T e che hanno trovato successivamente conferma nelle migliori prestazioni dei ricevitori DVB-T rispetto al ricevitore prototipale impiegato nelle prove di laboratorio. I valori di CCI misurati sul 64 QAM-2/3 sono invece risultati molto vicini a quelli adottati dalla CEPT [6].

3. Conclusioni

L'articolo riporta i risultati delle valutazioni di laboratorio effettuati da Rai CRIT sul dimostratore DVB-T, realizzato secondo la specifica tecnica [5] nell'ambito del progetto RACE dTTb. Le misure hanno permesso di valutare la robustezza della modulazione COFDM, che rappresenta il cuore del sistema digitale terrestre europeo, in presenza delle tipiche distorsioni e interferenze che possono essere introdotte dal canale trasmissivo, come il rumore gaussiano e impulsivo, gli echi di diversa ampiezza e ritardo, l'effetto Doppler, l'interferenza generata da altri segnali DVB-T e da segnali TV analogici, il rumore di fase del tuner, ecc.

I valori dei degradamenti rispetto al caso di canale ideale misurati nelle varie condizioni, confermano sostanzialmente le previsioni delle simulazioni al calcolatore

e forniscono una valutazione globale delle prestazioni del sistema DVB-T.

Questi risultati, che hanno rappresentato un contributo della RAI al rapporto CEPT/EBU per la conferenza di Chester [6], forniscono utili elementi per la pianificazione dei nuovi servizi DVB-T, nello scenario ibrido digitale-analogico che caratterizza la fase di avvio, in termini di rapporto portante/rumore C/N e di rapporti di protezione co-canale da e verso i servizi televisivi analogici esistenti per le varie configurazioni di trasmissione previsti nella normativa.

Bibliografia

1. A.Morello, G.Blanchietti, C.Benzi, B.Sacco, M.Tabone: “Performance assessment of a DVB-T television system”, Rai-CRIT; Montreux TV Symposium, June 1997.
2. A.Bertella;M.Cominetti;S.Ripamonti;M .Visintin: “The RAI DVB-T pilot trials in Turin”, IBC 2000; Amsterdam; September 2000.
3. P.B.Forni, S.Ripamonti, V.Sardella: “Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio”; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
4. V.Mignone, A.Morello, M.Visintin: “Il sistema europeo per la Televisione Digitale Terrestre”, Elettronica e Telecomunicazioni 1/2002.
5. ETSI: “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”, EN 300744 - V1.4.1, January 2001.
6. CEPT: “The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the Introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T)”, July 1997.
7. ETSI: “Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers”,

Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre

ing. Vittoria **Mignone**,
ing. Alberto **Morello**,
ing. Michele **Visintin**

Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

Sommario

In ambito al Progetto DVB (Digital Video Broadcasting) e ai progetti europei RACE dTTb, ACTS VALIDATE e MOTIVATE, il Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica della Rai (CRIT) ha direttamente contribuito alla definizione e alla validazione del sistema per la diffusione televisiva digitale terrestre (DVB-T). Il sistema, che permette la ricezione fissa, portatile e mobile, è basato sulla modulazione multiportante COFDM, una soluzione tecnica avanzata che consente di configurare i parametri di trasmissione in modo flessibile per meglio adattarsi alle caratteristiche del canale di diffusione terrestre. Sono possibili due modalità operative: con 2K portanti per le reti di diffusione convenzionali multifrequenza (MFN), e con 8K portanti per operare anche su reti a singola frequenza (SFN). L'introduzione di reti SFN, non possibile nelle trasmissioni televisive analogiche, consente una utilizzazione ottimale dello spettro.

L'articolo presenta le caratteristiche principali del sistema DVB-T, con particolare attenzione alla modulazione COFDM, e ne illustra le prestazioni ottenute da Rai-CRIT mediante simulazioni al calcolatore.

1. Introduzione

Il rapido progresso delle tecnologie digitali, già a partire dagli anni '90, nei campi della produzione, distribuzione e diffusione televisiva e le nuove prospettive offerte agli operatori del settore e all'industria di consumo, hanno portato alla costituzione nel 1993 del Progetto europeo DVB (Digital Video Broadcasting). Il Progetto, che ora raccoglie oltre 300 Membri europei ed extraeuropei, ha l'obiettivo di armonizzare le strategie volte all'introduzione della televisione digitale e dei nuovi servizi multimediali e interattivi sui vari mezzi trasmissivi e definire le relative specifiche tecniche. Il primo significativo risultato è stato raggiunto con la definizione della specifica del sistema DVB-S per la diffusione diretta da satellite di TV multi-programma, alla quale ha contribuito direttamente il Centro Ricerche Rai [1],[2],[3]; subito dopo sono state definite le specifiche del sistema DVB-C per la distribuzione dei segnali televisivi attraverso le reti via cavo [4] e, successivamente, una intera "famiglia" di specifiche che, partendo dal mondo della televisione, si sono progressivamente allargate a interessare lo scenario delle tecnologie emergenti e dei nuovi media. Le specifiche tecniche approvate dal DVB vengono ratificate dall'ETSI che ne attribuisce la veste di standard europei.

All'interno della famiglia DVB le specifiche per la televisione digitale terrestre (DVB-T) assumono una importanza rilevante data la valenza "universale" del servizio televisivo che, nel nostro Paese, raccoglie quasi il 100% dell'utenza. La definizione della specifica DVB-T risale al novembre 1995, con approvazione come standard ETSI nel febbraio 1997 [5]; il processo di normaliz-

Fig. 1 - Diagramma a blocchi funzionale del sistema di trasmissione DVB-T

zazione, piuttosto lungo e complesso, è stato influenzato da vari fattori: la complessità tecnica del problema, dovuta anche alla maggiore ostilità della propagazione del segnale elettromagnetico nelle bande terrestri VHF/UHF rispetto alla diffusione via satellite, la congestione dello spettro di frequenza per la diffusione televisiva terrestre in gran parte dell'Europa ed in particolare nel nostro Paese, l'interesse di soddisfare nuove modalità operative su reti isofrequenziali (SFN) anche a grande copertura, i diversi piani di introduzione dei servizi digitali terrestri formulati dalle varie Amministrazioni europee.

Un contributo decisivo alla definizione delle specifiche DVB-T è stato dato dall'attività condotta dai maggiori radiodiffusori in ambito al progetto europeo RACE dTTb ed a progetti nazionali (HD-DIVINE e HDTV-T), che hanno successivamente adeguato i rispettivi piani di ricerca e sviluppo per soddisfare i requisiti di servizio definiti dal Modulo Commerciale del DVB.

Fra questi:

- la necessità di mantenere la maggior comunanza possibile con i sistemi DVB-S e DVB-C, al fine di consentire la produzione di ricevitori commerciali multi-standard a basso costo;
- la possibilità di ricezione fissa con terminali portatili, dotati di antenna omnidirezionale, in aggiunta alla ricezione con antenna direttiva posta sul tetto degli edifici;
- la possibilità di introdurre reti SFN a larga copertura (regionale e nazionale) impiegando trasmettitori sincronizzati operanti sullo stesso canale a radiofrequenza (RF), al fine di sfruttare i significativi vantaggi in termini di efficienza spettrale rispetto alle reti convenzionali multi-frequenza (MFN).

L'articolo descrive le caratteristiche principali del sistema DVB-T (Sezione 2) e ne illustra in dettaglio le prestazioni valutate per mezzo di simulazioni software al calcolatore (Sezione 3) che hanno trovato

un sostanziale riscontro nelle valutazioni effettuate in laboratorio [6] e sul campo [7], in vista della prossima introduzione nel nostro Paese dei primi servizi di televisione digitale terrestre [8].

2. La specifica DVB-T

Il sistema DVB-T, la cui architettura generale è mostrata in figura 1, è basato sull'adozione degli standard MPEG-2 per la Codifica del segnale audio/video di sorgente e per la Multiplazione: è stato sviluppato per la trasmissione di segnali televisivi multi-programma a definizione convenzionale nel formato MPEG-2 MP@ML, ma è aperto all'evoluzione verso l'alta definizione (HDTV) mediante l'uso di livelli e profili MPEG-2 più elevati.

Gli elementi indicati con un bordo rosso nel diagramma a blocchi di figura 1 sono comuni al sistema DVB-S. Essi includono: la struttura di trama (derivata dal Multiplatore di Trasporto MPEG-2), la dispersione dell'energia del segnale per uniformare la distribuzione spettrale all'interno del canale RF, una sofisticata tecnica di protezione dagli errori tramite concatenazione di un codice esterno con un codice interno a tasso di codifica variabile mediante processo di interlacciamento. Il codice esterno è il Reed-Solomon RS(204,188, t=8) accorciato, derivato dall'originale codice sistematico RS(255,239, t=8). I codici interni sono convoluzionali punturati, basati su un codice convoluzionale madre a tasso 1/2 con 64 stati. Oltre al codice madre, il sistema permette i tassi punturati di 2/3, 3/4, 5/6 and 7/8. L'interlacciatore è basato sul processo di interlacciamento convoluzionale di Forney ed ha profondità pari a 12.

2.1 Modulazione e Codifica di Canale

Il cuore del sistema DVB-T risiede nell' "Adattatore di canale" che è stato progettato specificatamente per fornire la massima comunanza con i sistemi via satellite e cavo e garantire le migliori prestazioni nella diffusione del segnale sui canali televisivi terrestri. Esso include la modulazione digitale e la codifica di canale per la correzione degli errori di trasmissione.

Il tipo di modulazione digitale adottato dal DVB differisce sensibilmente per i sistemi via satellite, via cavo e sui canali terrestri, in quanto deve adattarsi strettamente alle diverse caratteristiche della propagazione e del canale RF. Il canale via satellite è fondamentalmente non lineare, a larga banda e limitato in potenza: pertanto la modulazione QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) a singola portante adottata nel sistema DVB-S risulta idonea allo scopo. Le reti via cavo sono caratterizzate invece da distorsioni lineari causate dal disadattamento della rete e, sebbene non limitate in potenza, sono soggette a limitazioni di banda; sulla base di questi vincoli, il sistema DVB-C usa modulazioni M-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) a singola portante e ad elevata efficienza spettrale, e non include l'interlacciatore e il codice interno; è tuttavia previsto l'impiego nel ricevitore di un equalizzatore adattativo degli echi che possono essere presenti nella rete in cavo.

Il canale terrestre è caratterizzato da propagazione multi-cammino, dovuta alle riflessioni, che può degradare pesantemente il segnale trasmesso (figura 2). Gli echi naturali dell'ordine di alcuni microsecondi e legati all'orografia del terreno, così come gli echi artificiali dell'ordine di centinaia di microsecondi dovuti ai segnali provenienti dai vari trasmettitori isofrequenziali presenti nelle reti SFN, non possono essere

trattati con tecniche di modulazione a portante singola, anche perché richiederebbero l'impiego di equalizzatori molto lunghi e complessi. Pertanto, sulla base di tali considerazioni e dei risultati di accurate valutazioni tecniche comparative, è stata scelta la modulazione multiportante COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [9] [10], già adottata con successo nel DAB (Digital Audio Broadcasting) [11], il sistema proposto per la diffusione radiofonica digitale.

Il principio su cui si basa questa tecnica di modulazione consiste nel distribuire il flusso dati totale tra moltissime portanti (a banda stretta e quindi a bassa velocità di trasmissione) equispaziate in frequenza, all'interno della banda del canale di diffusione (figura 3). A ciascuna delle portanti è applicata la modulazione digitale QPSK, M-QAM, ecc...; la mutua ortogonalità è garantita per una spaziatura in frequenza tra le portanti pari alla velocità di simbolo, $1/T_u$. Il processo OFDM è attuato per mezzo di una I-FFT (Inverse Fast Fourier Transform).

Il sistema DVB-T è caratterizzato da due modalità operative, la prima con FFT su 2k portanti per reti convenzionali multi-frequenza (MFN), la seconda con FFT su 8k portanti per coprire anche reti a frequenza singola (SFN).

Il sistema COFDM è inerentemente robusto contro il fading selettivo in frequenza presente sul canale terrestre, affetto da propagazione multi-cammino, in quanto le portanti a banda stretta occupano una piccola porzione dello spettro, dove la risposta in frequenza del canale è "localmente piatta" e non distorcente (figura 2). La resistenza dei sistemi COFDM contro gli echi è anche basata sulla presenza nel simbolo OFDM di un intervallo di guardia temporale (con durata pari a T_g) che separa simboli OFDM adiacenti (figura 3). L'intervallo di guardia consiste in una continuazione ciclica della parte utile T_u, del simbolo ed è inserito davanti ad essa. Dei campioni complessi che corrispondono ad un simbolo, il ricevitore scarta quelli

Fig. 2 - Modello di propagazione terrestre

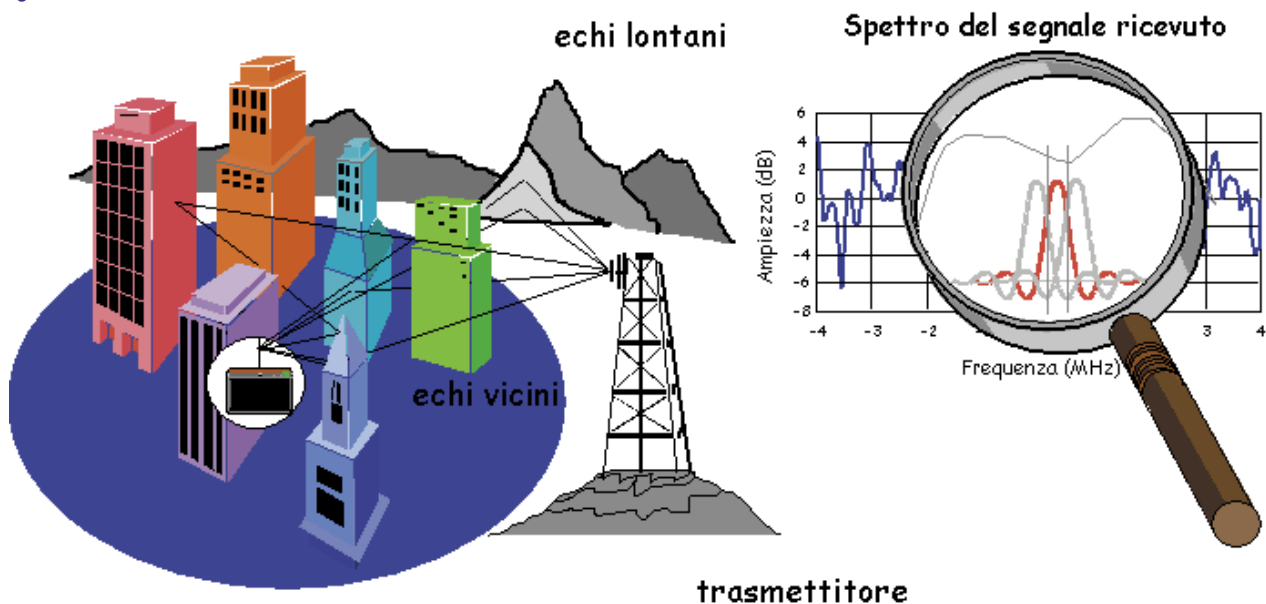
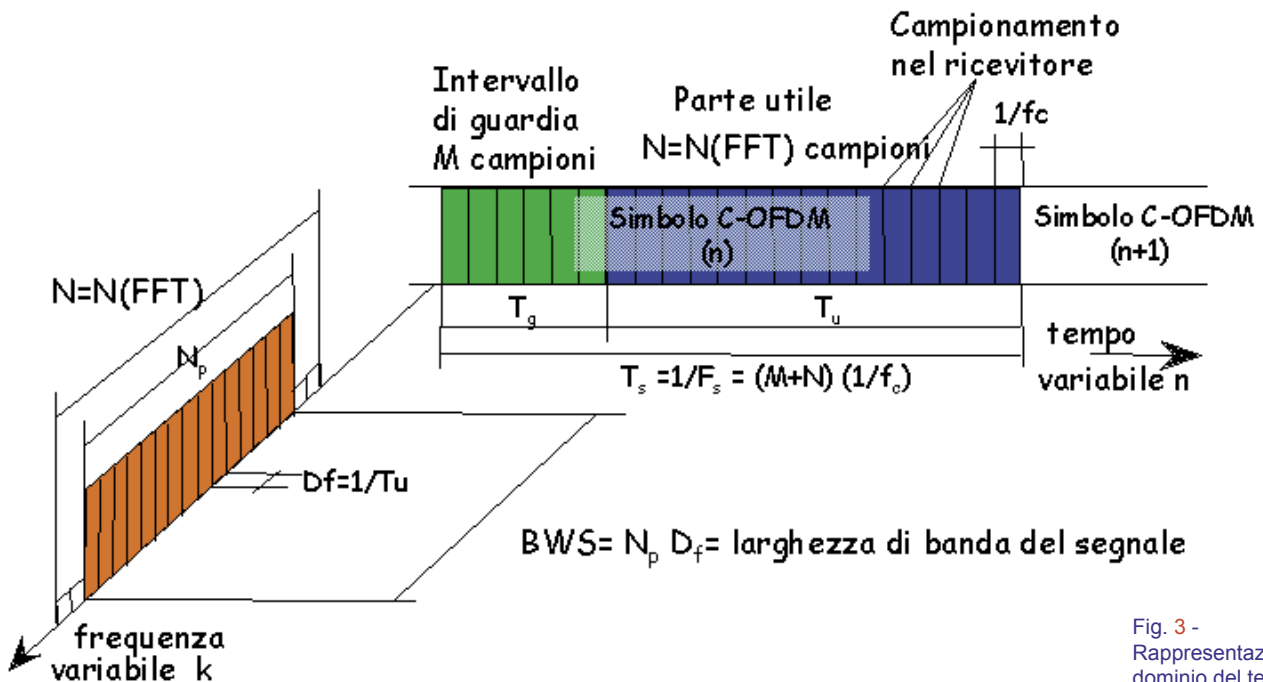
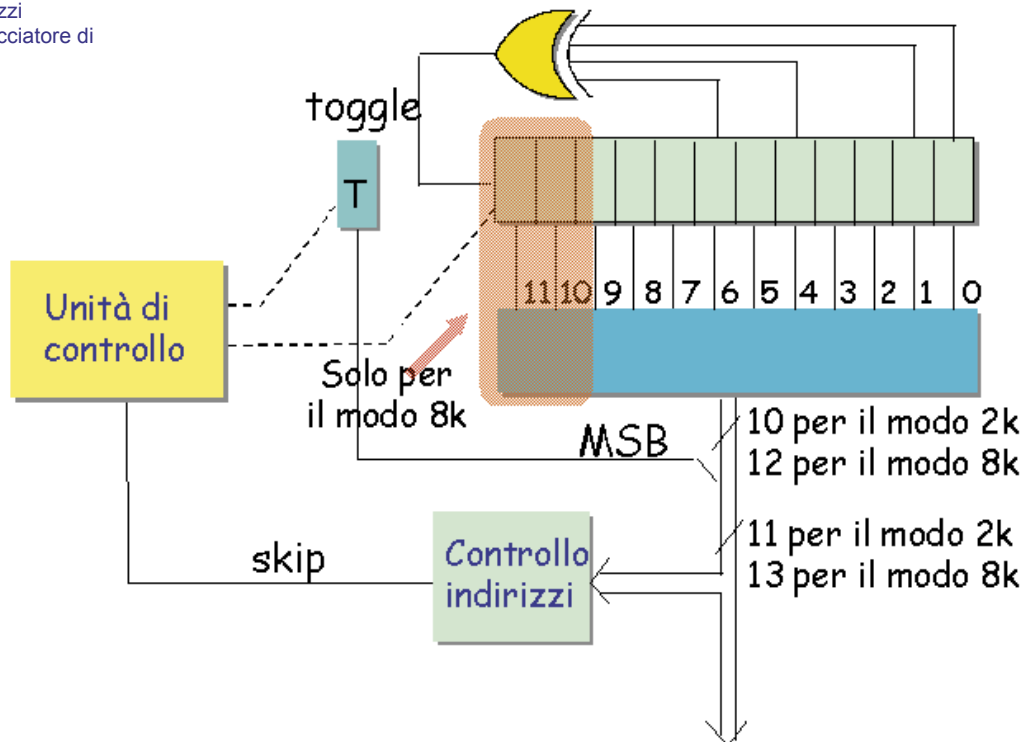



Fig. 3 - Rappresentazione nel dominio del tempo e della frequenza di un simbolo C-OFDM

relativi all'intervallo di guardia, cosicchè gli echi che raggiungono il ricevitore con un ritardo t inferiore a T_g non generano ISI (Inter Symbol Interference).

In aggiunta all'intervallo di guardia, il sistema COFDM fa uso di un potente schema di correzione degli errori che permette il recupero dell'informazione trasportata da quelle portanti che sono state affette da fading selettivo in frequenza. A questo scopo, dopo la codifica interna (con codice convoluzionale), è presente anche un interlacciatore in frequenza che consente di ottenere la massima dispersione delle portanti corrotte nel flusso dati. L'interlacciatore interno consiste nella concatenazione di un interlacciatore di bit, per separare i bit mappati sui punti della costellazione, e di un interlacciatore di simbolo, per disperdere le portanti che trasportano i dati utili. L'interlacciatore di simbolo è stato sviluppato presso Rai-CRIT, con l'obiettivo di ridurre i requisiti di memoria nel terminale d'utente e, contemporaneamente, massimizzare la dispersione delle portanti adiacenti.

La generazione degli indirizzi dell'interlacciatore di simbolo, rappresentata in figura 4, è caratterizzata da una realizzazione molto semplice che non richiede di memorizzare la regola di interlacciamento nel ricevitore e riduce i requisiti di memoria. Il nucleo è costituito dal classico generatore di sequenza binaria pseudo-casuale a massima lunghezza (PRBS). L'intera sequenza 2k o 8k è ottenuta ripetendo due volte il ciclo PRBS e aggiungendo il bit più significativo (MSB) cambiato ad ogni nuovo valore. La regola di permutazione dei fili è stata ottimizzata con simulazioni al calcolatore per ottenere la massima dispersione delle portanti dati adiacenti. Il blocco di controllo dell'indirizzo verifica che l'indirizzo così generato sia inferiore al numero di portanti dati: se la condizione non è verificata viene generato un altro valore. Al fine di minimizzare ulteriormente l'ammontare di memoria richiesta, la regola di generazione dell'indirizzo è usata come indirizzo di "scrittura" per i simboli

Fig. 4 - Generazione degli indirizzi dell'interlacciatore di simbolo

OFDM pari, e come indirizzo di "lettura" per quelli dispari.

Le portanti dati, che portano le informazioni utili, sono modulate in M-QAM (M=4, 16, 64), con mappatura di Gray. Costellazioni M-QAM non uniformi sono anche previste nel caso di trasmissione gerarchica.

I parametri principali del sistema DVB-T sono riportati in Tabella 1. Il sistema è ottimizzato per canali a 8 MHz (spaziatura di canale in UHF), ma può essere adattato anche su canali da 7 MHz (utilizzati in molti paesi, tra i quali l'Italia) e da 6 MHz (spaziatura adottata in USA e Giappone), modificando opportunamente la frequenza di campionamento nel ricevitore (Nota 1).

Nota 1 - Le tre possibili spaziature di canale in frequenza sono state introdotte nella specifica al fine di permettere la più vasta adozione del sistema DVB-T.

Tabella 1. Parametri del sistema DVB-T (canalizzazione a 8MHz)

Parametro	Modalità 8K				Modalità 2K			
Portanti attive	6817				1705			
Portanti dati	6048				1512			
Durata utile del simbolo T_u	896 μs				224 μs			
Spaziatura fra le portanti $1/T_u$	1116 Hz				4464 Hz			
Larghezza di banda	7,61 MHz							
$\Delta = T_g/T_u$	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Intervallo di guardia T_g	224 μs	112 μs	56 μs	28 μs	56 μs	28 μs	14 μs	7 μs

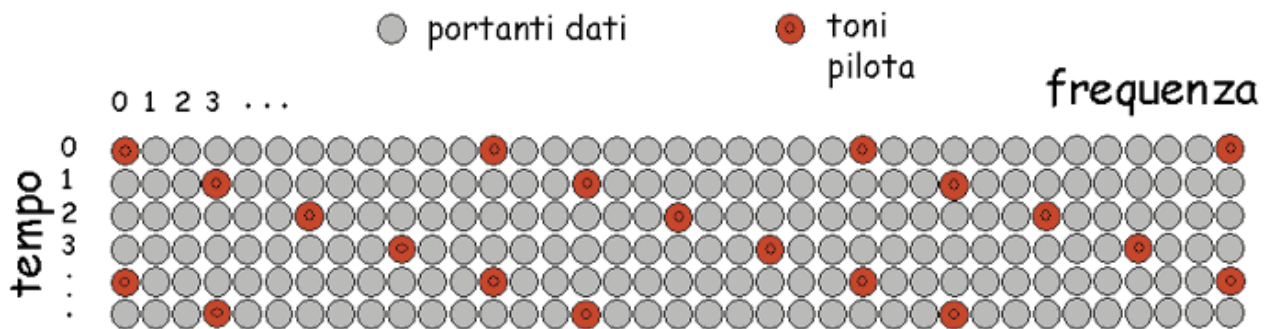



Fig. 5 - Disposizione delle portanti all'interno della trama

2.2 Segnalazione delle Informazioni Ausiliarie

Il segnale digitale trasmesso è organizzato in trame contenenti ciascuna 68 simboli OFDM; 4 trame costituiscono una super-trama, che contiene un numero intero di pacchetti RS (204, 188), indipendentemente dai parametri di modulazione e codifica di canale. Per aumentare l'efficacia degli algoritmi di sincronizzazione e demodulazione nel ricevitore, si adotta una trama OFDM specifica che, oltre alle portanti dati, che trasportano l'informazione, contiene altre portanti destinate a funzioni ausiliarie:

- portanti pilota diffuse, inserite nello spettro con una densità di 1/12 nel dominio della frequenza e di 1/4 nel dominio del tempo (figura 5);
- portanti pilota continue, che occupano la stessa posizione in ogni simbolo OFDM;
- portanti TPS (Transmission Parameter Signalling) in posizione fissa nello spettro OFDM, modulate in DBPSK, su cui sono trasportate informazioni sulla modulazione, gerarchia, durata dell'intervallo di guardia, tasso di codifica interno, modalità di trasmissione, numero di trama nella super-trama.

Il numero di portanti che trasportano dati utili è costante in ogni simbolo OFDM: 1512 nella modalità 2k e 6048 nella modalità 8k. Le altre sono: portanti pilota – trasmesse ad un livello di potenza superiore (+2,5 dB) – e portanti TPS, e possono essere usate per la sincronizzazione di trama, di frequenza, di tempo, per la stima del canale, l'identificazione della modalità di trasmissione e per inseguire il rumore di fase.

2.3 Demodulazione

Sul lato ricevente, viene dapprima estratta la parte utile del simbolo dal segnale ricevuto, rimuovendo l'intervallo di guardia. Poi è applicato il processo di FFT, che restituisce il segnale OFDM nel dominio della frequenza, sul quale è realizzata la demodulazione coerente delle portanti dati: le varie portanti vengono equalizzate in ampiezza e fase dividendo i campioni ricevuti per la stima della risposta in frequenza del canale. Nella modalità di demodulazione adottata dai ricevitori commerciali questa stima è effettuata attraverso l'interpolazione nel tempo e nella frequenza (in ampiezza e fase) delle portanti pilota diffuse.

Per quanto riguarda l'interpolazione nel tempo, sono disponibili due metodi per completare il pettine di portanti diffuse relative ad un dato simbolo OFDM: una semplice accumulazione delle portanti pi-

lota appartenenti agli ultimi quattro simboli OFDM (chiamato algoritmo 1-D) oppure una interpolazione lineare delle portanti pilota precedente e successiva al simbolo OFDM (algoritmo 2-D). Quest'ultimo metodo garantisce al ricevitore una maggiore capacità di inseguire le variazioni del canale, a spese di una maggiore complessità del ricevitore (in particolare, è richiesta maggior memoria).

A causa della densità complessiva del pettine di portanti diffuse nella trama OFDM (una portante pilota ogni tre portanti), la stima della risposta in frequenza del canale, prima dell'interpolazione in frequenza, è sotto-campionata di un fattore 1/3; pertanto la sua Trasformata di Fourier (corrispondente alla stima della risposta all'impulso del canale per tempi negativi, per via della "proprietà duale" della Trasformata di Fourier F{F{x(t)}} = x(-t)) è periodica con periodo normalizzato 1/3.

Al fine di attenuare le ripetizioni spettrali (aliasing) (figura 6) generate dal processo di campionamento, il filtro di interpolazione in frequenza deve fornire una attenuazione fuori banda pari a 20÷30 dB alla frequenza normalizzata 1/3 alla quale si trova la prima ripetizione dello spettro. Inoltre esso dovrebbe essere "piatto" in una banda normalizzata pari a T_f/T_u (indicato nel seguito come intervallo di corretta equalizzazione). L'interpolazione nel dominio del tempo e della frequenza permette anche una piccola riduzione del rumore Gaussiano da cui è affetta la stima della risposta del canale.

In conclusione, la ricezione del segnale DVB-T effettuata utilizzando algoritmi di equalizzazione che sfruttano solo le portanti pilota diffuse – come avviene in genere nei ricevitori commerciali – risente di un rapido degradamento delle prestazioni in presenza di echi che cadono al di fuori dell'intervallo di corretta equalizzazione, normalmente coincidente con l'intervallo di guardia. Questi echi non possono essere equalizzati e, specialmente nella pianificazione di reti a Singola Frequenza, risultano responsabili di interferenza intersimbolica, e come tali provocano un degradamento simile a quello dovuto a rumore Gaussiano scorrelato.

Un algoritmo di equalizzazione della risposta del canale, denominato CD3, che consente di ridurre sensibilmente il de-

Fig. 6 - Interpolazione nel dominio del tempo della funzione di trasferimento del canale

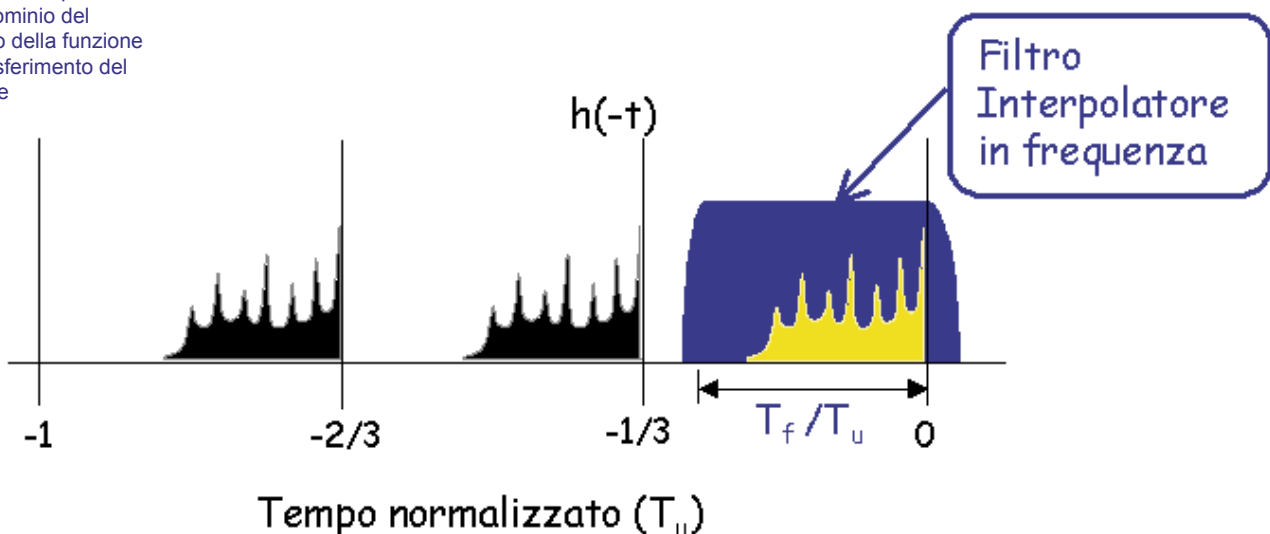



Tabella 2. C/N (dB) richiesto per un ricezione QEF e flusso binario utile (Mbit/s) per tutte le combinazioni di intervallo di guardia, costellazione e tasso di codifica, relativo a sistemi non gerarchici

		C/N richiesto per BER = 2 x 10^{-4} dopo Viterbi QEF dopo Reed-Solomon			Flusso binario utile (Mbit/s)			
		Canale			$\Delta=T_g/T_u$			
Modulazione	Codice	Gaussiano	Rice (F)	Rayleigh (P)	1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3,1	3,6	5,4	4,98	5,53	5,85	6,03
QPSK	2/3	4,9	5,7	8,4	6,64	7,37	7,81	8,04
QPSK	3/4	5,9	6,8	10,7	7,46	8,29	8,78	9,05
QPSK	5/6	6,9	8,0	13,1	8,29	9,22	9,76	10,05
QPSK	7/8	7,7	8,7	16,3	8,71	9,68	10,25	10,56
16QAM	1/2	8,8	9,6	11,2	9,95	11,06	11,71	12,06
16QAM	2/3	11,1	11,6	14,2	13,27	14,75	15,61	16,09
16QAM	3/4	12,5	13,0	16,7	14,93	16,59	17,56	18,10
16QAM	5/6	13,5	14,4	19,3	16,59	18,43	19,52	20,11
16QAM	7/8	13,9	15,0	22,8	17,42	19,35	20,49	21,11
64QAM	1/2	14,4	14,7	16,0	14,93	16,59	17,56	18,10
64QAM	2/3	16,5	17,1	19,3	19,91	22,12	23,42	24,13
64QAM	3/4	18,0	18,6	21,7	22,39	24,88	26,35	27,14
64QAM	5/6	19,3	20,0	25,3	24,88	27,65	29,27	30,16
64QAM	7/8	20,1	21,0	27,9	26,13	29,03	30,74	31,67

gradamento delle prestazioni dovuto agli echi con ritardo superiore all'intervallo di guardia è stato sviluppato da Rai-CRIT [12] [13] con particolare attenzione alla ricezione di segnali DVB-T su reti SFN.

2.4 Prestazioni e Capacità Trasmissiva

Il sistema DVB-T offre una capacità utile per la trasmissione del flusso binario che varia da circa 5 Mbit/s a 31,7 Mbit/s, a seconda della configurazione di trasmissione adottata: costellazione, tasso di codifica del codice correttore interno e dalla durata dell'intervallo di guardia. Per un dato insieme di questi parametri, le modalità operative 2k e 8k offrono la stessa capacità trasmissiva.

Come risulta dalla tabella 2, derivata dall'Annesso A della specifica DVB-T [5], l'impiego di una configurazione ad elevata capacità trasmissiva, come il 64-QAM (rate 7/8; intervallo di guardia normalizzato $\Delta=T_g/T_u=1/32$), comporta però prestazioni meno robuste in termini di rapporto portante/rumore C/N richiesto per una corretta ricezione (circa 26,1 dB su canale affetto da rumore gaussiano). Per contro, un sistema a bassa capacità trasmissiva – come il QPSK (rate1/2; Δ=1/4) – è molto robusto e richiede un basso valore di C/N (circa 3,1 dB). La scelta della configurazione è quindi il risultato di un compromesso tra capacità trasmissiva e robustezza del segnale, in modo da soddisfare i requisiti di servizio.

La tabella 2 riporta, per tutte le combinazioni di costellazione e tasso di codifica previste dalla normativa, le prestazioni del sistema in termini di C/N, valutate

per mezzo di simulazioni al calcolatore; riporta inoltre i valori del flusso binario utile (Mbit/s) in funzione dell'intervallo di guardia normalizzato Δ. I valori del rapporto C/N richiesto si riferiscono alla ricezione Quasi Error Free (QEF), corrispondente a meno di un evento di errore per ora sul segnale all'ingresso del demultiplatore MPEG-2 (BER<10^{-11}), dopo che è stato sottoposto al procedimento di correzione degli errori tramite algoritmo di Viterbi e decodifica Reed-Solomon.

Nelle simulazioni è stata ipotizzata una perfetta stima del canale e non sono incluse né la perdita di potenza dovuta alle portanti pilota (paragrafo 2.2) né le perdite dovute alla realizzazione del ricevitore e agli apparati inclusi nella catena di trasmissione. Le prestazioni sono date per un canale ideale affetto esclusivamente da rumore bianco Gaussiano (AWGN) e per due esempi di canale multi-percorso tipici della diffusione terrestre: il canale di Rice (F), rappresenta un tipico caso di ricezione fissa, per il quale è presente la linea di vista con il trasmettitore (segnale principale) più una serie di echi; il canale di Rayleigh (P), è un esempio di ricezione portatile con antenna omnidirezionale, caratterizzato dalla assenza della linea di vista.

I tassi di codifica più alti (5/6 e 7/8), quando vengono associati alla costellazione a più elevata efficienza spettrale (64-QAM), risultano molto sensibili al fading selettivo in frequenza. In pratica, per la stima del massimo numero di programmi TV che possono essere allocati in un canale a 8 MHz, assumendo una ricezione fissa con antenna direttiva, la configurazione più idonea è il 64-QAM a tasso 2/3; essa fornisce una capacità di flusso binario di circa 24 Mbit/s, nel caso di Δ=1/32, che consente tipicamente la trasmissione di 4 programmi a qualità convenzionale (SDTV a 6 Mbit/s ciascuno) o 6 programmi a qualità news (LDTV, 4 Mbit/s ciascuno). Questa configurazione di trasmissione è particolarmente idonea per le reti multifrequenza (MFN). L'impiego della multiplazione statistica associata alla codifica MPEG-2 a bit-rate variabile consente inoltre di aumentare il numero di programmi senza peggiorare la qualità audio/video.

Il processo di equalizzazione nel ricevitore comporta un degradamento del rapporto C/N dovuto alla presenza di rumore sulla funzione di trasferimento del canale stimata. Tale degradamento è dato dall'espressione:

$$\gamma_{CE} = 10 \text{Log}\left(1 + \frac{Wk}{\alpha D}\right) = \begin{cases} 1{,}8 \text{ dB per la stima 1-D} \\ 1{,}3 \text{ dB per la stima 2-D} \end{cases}$$

dove:

- W (assunto pari a 0,3 per un intervallo di guardia Δ pari a 1/4) è la banda equivalente di rumore del filtro di interpolazione in frequenza (normalizzato rispetto a T_u)
- α rappresenta il livello di elevazione delle portanti pilota (16/9)
- D è la densità delle portanti pilota dopo l'interpolazione nel tempo (D = Df/Dt =1/3)
- k è il guadagno del corrispondente filtro interpolatore (vale 1 per la stima di canale 1-D e 11/16 per la stima di canale 2-D).

Come risulta dalla formula, si può prevedere un degradamento del rapporto C/N di 1,8 dB o 1,3 dB, a seconda dell'algoritmo di stima del canale adottato. L'algoritmo 1-D, caratterizzato da maggiore semplicità realizzazione e minore requisito di memoria nel ricevitore, introduce il degradamento maggiore.

Un ulteriore degradamento del rapporto

C/N è imputabile alle portanti pilota, che sono trasmesse ad un livello di potenza superiore rispetto alle portanti utili. La perdita di potenza che ne risulta è data da:

$$\gamma_P = 10 \, \mathrm{Log} \left[\eta_P (1 - \alpha) + \alpha \right] = 0{,}33 \ \mathrm{dB}$$

dove h_P rappresenta il rapporto tra portanti utili e TPS (non amplificate) e portanti totali (efficienza delle portanti pilota) che risulta pari a 6116/6817 nella modalità 8k.

3. Valutazione della Copertura

La copertura di un servizio televisivo terrestre si misura attraverso la percentuale di tempo e di località per la quale il servizio è garantito.

La televisione analogica è caratterizzata da un degradamento graduale della qualità del segnale in funzione dell'intensità del campo elettromagnetico ricevuto (e.m.); pertanto gli attuali servizi televisivi analogici sono stati pianificati al 50% del tempo e delle località, secondo le indicazioni della Raccomandazione 370 ITU. Al contrario, nel caso dei sistemi televisivi digitali, al ridursi del campo e.m. si verifica una rapida transizione dalla ricezione quasi perfetta alla perdita del servizio (soglia di ricezione).

La definizione dell'obiettivo e dell'area di copertura è pertanto un punto estremamente critico. In pratica, garantire una disponibilità del servizio per il 99% delle località e del tempo risulta un obiettivo di copertura troppo oneroso a causa dei costi della rete di diffusione: infatti, al fine di coprire anche la percentuale residua delle piccole aree peggio servite, è necessario o incrementare drasticamente la potenza trasmessa o impiegare un numero maggiore di trasmettitori.

Per questa ragione negli studi di pianificazione dei servizi DVB-T è stata adottata dalla CEPT la definizione di copertura “buona” che individua il caso in cui all'interno di una piccola area viene coperto il 95% delle località. Parimenti, con “accettabile” si definisce il caso in cui viene coperto solo il 70% delle località all'interno della stessa piccola area [14]. Queste scelte derivano dalla considerazione che, per una data situazione, la ricezione può essere migliorata anche trovando una posizione più adeguata per l'antenna, usando un'antenna più direzionale o, nel caso di ricezione fissa, impiegando un amplificatore d'antenna a basso rumore con un guadagno più alto.

Una volta definito il valore minimo del rapporto C/N che caratterizza la configurazione del sistema si prendono in esame gli elementi di propagazione, nella gamma di frequenze RF di interesse, derivando dapprima il valore minimo del campo e.m. mediano equivalente, al limite dell'area di copertura, che garantisce la voluta percentuale di località servite. Da questo sono quindi calcolati gli altri parametri di trasmissione, quali potenza del trasmettitore, diagramma d'antenna e configurazione ottimale della rete, usando gli stessi metodi adottati per il servizio analogico.

Condizioni di Ricezione

La tipica condizione di ricezione fissa è individuata dall'impiego di un'antenna direttiva installata sul tetto di un edificio. Per il calcolo del campo e.m. mediano equivalente desiderato, in tabella 3 sono riportati in funzione della frequenza valori realistici di guadagno d'antenna (relativi ad un dipolo a mezza onda) e di perdita sul cavo coassiale di discesa relativi ad un'altezza di 10 m rispetto al terreno.

Tabella 3. Parametri d'antenna per la ricezione fissa

	Frequenza [MHz]		
	200	500	800
Guadagno d'antenna [dB]	7	10	12
Perdita di discesa[dB]	2	3	5

La ricezione portatile è individuata tipicamente da un ricevitore equipaggiato con un'antenna omni-direzionale collegata o integrata posta a 1,5 m rispetto al terreno (in ambiente esterno) o rispetto al pavimento (in ambiente interno). Le condizioni di ricezione differiscono pertanto da quelle di ricezione fissa per l'assenza di guadagno e direttività dell'antenna, per le trascurabili perdite sul cavo di connessione dell'antenna, per la minore altezza di ricezione rispetto al terreno e per la notevole attenuazione del campo e.m. nel caso di ricezione all'interno di edifici. La tabella 4 riassume valori tipici dei vari parametri: guadagno d'antenna, perdita di discesa, perdita di altezza e perdita da penetrazione di edifici (valore mediano) per le bande di frequenza VHF (Banda III, 174÷230 MHz) e UHF (Bande IV and V, 470÷862 MHz).

Definizione dell'Area di Copertura

Nel definire l'area di copertura per ogni condizione di ricezione, è stato adottato un approccio a tre livelli [14]..

Tabella 4. Parametri d'antenna per la ricezione portatile

	Banda di Frequenza	
	VHF	UHF
Guadagno d'antenna [dB]	-2.2	0
Perdita di discesa [dB]	0	0
Perdita d'altezza [dB]	10	12
Perdita di edificio [dB]	8	7

L'unità più piccola è la località di ricezione, nella quale il livello del segnale voluto è sufficiente a sovrastare il rumore e l'interferenza per una data percentuale di tempo (tipicamente 99%).

Il secondo livello è la piccola area di copertura, tipicamente 100 m per 100 m. Al suo interno, a causa delle irregolarità del terreno, il livello del campo e.m. ricevuto è soggetto a variazione casuale con la località, che è caratterizzata da una distribuzione log-normale con deviazione standard di circa 5,5 dB. In funzione della percentuale di località coperte, la copertura per una piccola area è classificata come buona se almeno il 95% delle località al suo interno sono coperte, e accettabile se almeno il 70% delle località sono coperte.

Infine il terzo livello è rappresentato dall'area di copertura di un trasmettitore, o di un gruppo di trasmettitori, formata dalla somma delle piccole aree individuali in cui si raggiunge la prestabilita percentuale di copertura: accettabile (70%) o buona (95%).

3.1 Copertura per un singolo trasmettitore

Le considerazioni riportate nel seguito sono relative alla copertura data da un singolo trasmettitore DVB-T. Le tabelle 5, 6 e 7 danno i valori del campo e.m. minimo E_{min} [dBµV/m] richiesto dal sistema – a seconda della configurazione di trasmissione adottata – per cinque tipici valori del rapporto C/N alla soglia di ricezione QEF: 2, 8, 14, 20 e 26 dB. Riportano inoltre, per la ricezione con antenna direttiva, portatile esterna e portatile interna con antenna omnidirezionale, il livello minimo del campo e.m. mediano E_{med} [dBµV/m] necessario a garantire una ricezione buona e una ricezione accettabile a 10 m di altezza rispetto al terreno, per il 50%

del tempo e nel 50% delle località. Tale valore è calcolato a partire dal valore di E_{min} [dBµV/m] nel punto di ricezione assumendo una cifra di rumore del ricevitore pari a 7dB. I valori riportati nelle tabelle si riferiscono alla Banda IV (500 MHz), con canalizzazione da 8 MHz [14].

La Raccomandazione CCIR 417-3 per la pianificazione del servizio televisivo analogico attribuisce un valore minimo di campo e.m. mediano di 62 [dBµV/m], in Banda IV, per ottenere con antenna ricevente direttiva una qualità d'immagine soddisfacente.

A titolo di esempio, nel caso di un segnale digitale in 64-QAM 2/3 (intervallo di guardia 1/32), si richiede un valore di C/N di circa 20 dB all'ingresso del ricevitore, a cui corrisponde un valore minimo di campo e.m. mediano di 53 [dBµV/m] (tabella 5). Dal confronto tra i valori di campo e.m. richiesti per il servizio televisivo analogico e quello digitale, si deduce che una buona ricezione del segnale digitale nella configurazione 64QAM 2/3 con antenna direttiva può essere ottenuta con un livello di potenza irradiata dal trasmettitore sensibilmente inferiore (9 dB) a quello richiesto dal sistema analogico, con il vantaggio di poter trasmettere, nel flusso di 24 Mbit/s disponibile, almeno quattro programmi SDTV invece di un programma analogico. Nel caso di ricezione portatile esterna agli edifici (tabella 6), sarebbe possibile ottenere una copertura accettabile a spese di un incremento di circa 13 dB della potenza minima trasmessa rispetto al caso della ricezione con antenna direttiva. Per una copertura accettabile all'interno degli edifici (tabella 7) sarebbe necessario aumentare ulteriormente la potenza irradiata di 8 dB.

Limitandoci a considerare il caso della ricezione fissa con antenna direttiva, in un ambiente ideale privo di interferenze da trasmettitori analogici, l'introduzione della televisione digitale potrebbe avvenire riducendo sensibilmente la potenza irradiata dagli attuali trasmettitori analogici. In pratica però l'introduzione dei nuovi servizi DVB-T mira anche a coprire per quanto possibile la ricezione con apparati portatili, essendo questo uno dei valori aggiunti del nuovo sistema rispetto alla soluzione analogica. Ciò richiederebbe un aumento considerevole della potenza irradiata dai trasmettitori, in particolare nel caso di ricezione interna agli edifici a causa dell'attenuazione del campo e.m. Un buon compromesso individuato in ambito CEPT [14] è di adottare per il 64-QAM 2/3 in Banda IV un valore minimo del campo e.m. di pianificazione, nella situazione ibrida analogico-digitale che caratteriz-

Tabella 5. Minimo campo e.m.mediano equivalente per ricezione con antenna direttiva

C/N_{min} [dB]	2	8	14	20	26
E_{min} [dBµV/m]	26	32	38	44	50
E_{med} [dBµV/m] per ricezione accettabile	29	35	41	47	53
E_{med} [dBµV/m] per buona ricezione	35	41	47	53	59

Tabella 6. Minimo campo e.m.mediano equivalente per ricezione portatile esterna

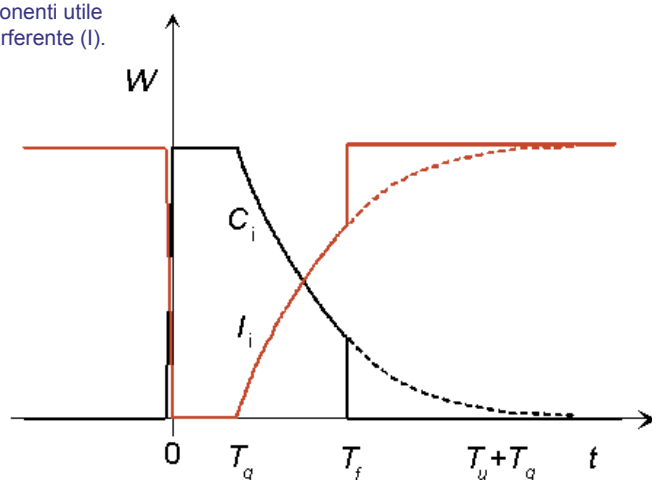
C/N_{min} [dB]	2	8	14	20	26
E_{min} [dBµV/m]	33	39	45	51	57
E_{med} [dBµV/m] per ricezione accettabile	48	54	60	66	72
E_{med} [dBµV/m] per ricezione buona	54	60	66	72	78

Tabella 7. Minimo campo e.m. mediano equivalente per ricezione portatile interna

C/N_{min} [dB]	2	8	14	20	26
E_{min} [dBµV/m]	33	39	45	51	57
E_{med} [dBµV/m] per ricezione accettabile	56	62	68	74	80
E_{med} [dBµV/m] per ricezione buona	66	72	78	84	90

za la fase iniziale, pari a 65 [dBµV/m], dell'ordine quindi di quello adottato per il servizio televisivo analogico. Si deve osservare però che tale valore è comprensivo di 8 dB imputabili a possibile interferenza cocanale da parte di segnali analogici. A regime, quando tutti i trasmettitori opereranno in digitale, l'interferenza dei trasmettitori analogici sarà rimossa, rendendo così possibile recuperare tutta o in parte questa potenza per migliorare la copertura, in particolare per quanto riguarda la ricezione portatile.

Poiché generalmente i servizi televisivi analogici nelle aree densamente popolate (aree urbane) sono pianificati a potenze largamente superiori al valore minimo richiesto per garantire il servizio ai limiti dell'area di copertura, si può concludere che gli attuali impianti di diffusione analogici – risolti ovviamente i possibili problemi di compatibilità interferenziale nella fase di avvio – potranno essere utilizzati, dopo gli opportuni adeguamenti richiesti dal nuovo standard, per introdurre il servizio digitale aperto alla grande utenza servita attraverso le attuali installazioni condominiali, e con buone possibilità di ricezione portatile.

Fig. 7 - Modello DVB-T per pianificazione SFN: suddivisione della potenza dell'eco (W) nei componenti utile (C) e interferente (I).

3.2 Copertura di una Rete a Singola Frequenza

La configurazione DVB-T idonea per l'impiego sulle reti SFN impiega 8K portanti e intervallo di guardia $T_g=T_u/4$, che consente di operare in presenza di echi molto lunghi e provenienti dai trasmettitori più lontani della rete. In questa situazione, il filtro per la stima del canale di un ricevitore convenzionale deve soddisfare alla diseguaglianza $1/4 < T_f/T_u < 1/3$. Se tali condizioni sono soddisfatte, la potenza di tutti gli echi ricevuti entro una finestra di durata T_g , cioè all'interno dell'intervallo di guardia, può essere considerata utile, e contribuisce positivamente alla potenza di segnale globale disponibile al ricevitore. Al di fuori dell'intervallo di guardia, ma all'interno dell'intervallo di corretta equalizzazione T_f, una parte della potenza dell'eco è associata allo stesso simbolo OFDM del segnale a ritardo nullo, e pertanto contribuisce positivamente alla potenza globale del segnale utile; un'altra parte di potenza dell'eco è associata al simbolo OFDM precedente e produce interferenza d'intersimbolo (ISI), che ha un effetto simile a rumore Gaussiano scorrelato. In aggiunta all'ISI, vi è una perdita di ortogonalità nelle portanti OFDM, indotta dagli echi al di fuori di T_g, che producono ICI (Inter-Carrier Interference). Pertanto, aumentando progressivamente il ritardo dell'eco al di fuori di T_g, il contributo utile C decresce e l'interferenza ISI-ICI I aumenta con legge quadratica. Gli echi con ritardo t maggiore dell'intervallo di corretta equalizzazione T_f sono quindi da considerarsi come pura interferenza (figura 7).

In formule:

$$C = \sum_i w_i C_i$$

$$I = \sum_i (1 - w_i) C_i$$

$$w_i = \begin{cases} 0 & \text{se } t < 0 \\ 1 & \text{se } 0 \leq t \leq T_g \\ \left(\dfrac{T_u - t + T_g}{T_u} \right)^2 & \text{se } T_g < t \leq T_f \\ 0 & \text{se } t > T_f \end{cases}$$

dove C_i è il contributo di potenza dall'i-esimo trasmettitore e w_i è il coefficiente di peso per la i-esima componente.

Il sistema DVB-T, con demodulazione convenzionale, è pertanto caratterizzato da un degradamento rapido delle prestazioni in presenza di echi con ritardo superiore all'intervallo di guardia.

Il sistema DAB per la diffusione radiofonica digitale [11] ha invece un intervallo di corretta equalizzazione T_f pari alla durata totale del simbolo T_g+T_u, in quanto impiega la demodulazione differenziale e non richiede stima di canale ed equalizzazione nel ricevitore. E' pertanto un "sistema a degradamento progressivo delle prestazioni".

Valutazione dei requisiti di C/N

Il sistema DVB-T può operare soddisfacentemente (flusso binario quasi senza errori QEF) su un canale affetto da rumore (N) e da interferenze (I) quando il rapporto totale C/(N+I) disponibile è maggiore o uguale all'Equivalent Protection Target (EPT) del sistema. Il parametro EPT ha una interpretazione fisica simile a quella del rapporto C/N richiesto dal sistema di modulazione/codifica, ma include anche il degradamento dovuto agli echi entro l'intervallo di equalizzazione T_f, che determina la criticità (selettività in frequenza) del canale. La seguente espressione empirica, in cui tutti i termini sono espressi in dB, è stata proposta da Rai-CRIT sulla base di simulazioni al calcolatore per stimare EPT:

$$EPT = \frac{C}{N}\bigg|_F + \left(\frac{C}{N}\bigg|_P - \frac{C}{N}\bigg|_F \right) \left(\frac{0.5}{\left(\frac{C}{N}\big|_P - \frac{C}{N}\big|_F \right)} \right)^{\frac{K_A}{10}} + \delta$$

dove:

- EPT è l'Equivalent Protection Ratio richiesto dal sistema in una particolare configurazione interferenziale,
- $C/N|_F$ è il rapporto segnale su rumore richiesto sul canale di Rice (tabella 2).
- $C/N|_P$ è il rapporto segnale su rumore richiesto sul canale di Rayleigh (tabella 2)
- K_A rappresenta la "criticità del canale dovuta ad echi artificiali", espressa come rapporto (in dB) tra la potenza ricevuta dal segnale principale e la potenza totale degli echi entro l' intervallo di corretta equalizzazione T_f (se K_A < 0 dB, K_A è posto a 0 dB, il caso più critico),
- δ è il margine di implementazione (posto rispettivamente a 2,5 e 3 dB per stima del canale CD3-OFDM e convenzionale).

Nei valori relativi al modello ideale, le espressioni 1 e 2 sono risolte numericamente per ottenere il rapporto g tra la potenza degli echi entro l'intervallo di guardia e degli echi al di fuori corrispondente alla condizione di ricezione QEF (BER= 2.10^{-4} dopo decodifica di Viterbi).

4. Conclusioni

Il sistema DVB-T per la diffusione televisiva digitale terrestre nelle bande VHF/UHF rappresenta un importante risultato nel processo di digitalizzazione condotto dal DVB sui vari media. Basato sulla modulazione multiportante COFDM, il sistema consente una notevole flessibilità operativa grazie ad una varietà di configurazioni di trasmissione mirate a ottimizzare le prestazioni a seconda dei requisiti di servizio (ricezione stazionaria con antenna direttiva e con terminali portatili e ricezione mobile) e delle caratteristiche del canale di diffusione terrestre, caratterizzato dalla presenza di riflessioni multiple.

Le prospettive del DVB-T, nell'attuale scenario dei servizi televisivi analogici, trovano un punto di forza nella possibilità di ottimizzare lo sfruttamento delle risorse in frequenza, attraverso l'introduzione di reti isofrequenziali (SFN), e di diversificare ed aumentare drasticamente l'offerta di programmi (tipicamente almeno 4 programmi TV arricchiti da applicazioni multimediali per canale a radiofrequenza).

Rai-CRIT ha direttamente contribuito alla definizione delle specifiche DVB-T, alla validazione del sistema in laboratorio e sul campo e al miglioramento delle sue prestazioni in situazioni critiche di ricezione. Il sistema è ora maturo per l'introduzione dei primi servizi operativi nel nostro Paese.

Bibliografia

1. M.Cominetti, A.Morello: "Digital video broadcasting over satellite (DVB-S): a system for broadcasting and contribution applications". International Journal on Satellite Communications; 2000; 18, p.393-410
2. M.Cominetti, A.Morello: "Il sistema europeo (DVB-S) per la diffusione televisiva da satellite". Elettronica e Telecomunicazioni, n°3, 1994
3. ETSI: "Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite service"; EN 300 421, 1993
4. ETSI: "Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for cable systems"; EN 300 429, 1994
5. ETSI: "Digital broadcasting systems for television, sound and data services; framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television"; EN 300 744, 1997
6. A.Bertella, B.Sacco, M.Tabone: "Valutazione in laboratorio delle prestazioni del sistema DVB-T"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
7. P.B.Forni, S.Ripamonti, V.Sardella: "Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
8. M.Cominetti: "La televisione digitale terrestre in Italia"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
9. Cimini: "Analysis and simulation of a digital mobile channel using Orthogonal Frequency Division Multiplexing", IEEE Transaction on Communications, COM-33, p.665-675, July 1985
10. M.Alard, R.Lassalle: "Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers", EBU Technical Review, n° 224, August 1987
11. ETSI: "Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers"; EN 300 401, 1996
12. V.Mignone, A.Morello, "CD3-OFDM: a novel demodulation scheme for fixed and mobile receivers", IEEE Transactions on Communications, COM-44(9), pp. 1144 - 1151, September 1996
13. V.Mignone, A.Morello, B.Sacco, M.Visintin, "CD3-OFDM: una soluzione avanzata per i servizi DVB-T su reti a singola frequenza (SFN)"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°2, 2002
14. CEPT: " The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the Introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T)"; Chester, July 1997